

Vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la recolección de información primaria en sistemas de
alcantarillado en Colombia

Erika Virginia Gelvez Albarracín

Monografía presentada para optar el título de Ingeniero Civil

Tutor:

Msc. DORALBA CARRILLO BAYONA

Ing. Ambiental

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Civil, ambiental y química

Pamplona, Norte Santander, Colombia

2024

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado primeramente a Dios, agradecida por su infinita bondad, sabiduría y fortaleza, que han sido mi guía en cada paso. Gracias por bendecirme con la perseverancia y el entendimiento necesarios para alcanzar esta meta.

A mi querida familia por la comprensión y fé en mis capacidades, han sido un pilar inquebrantable en este largo camino.

A mi madre, por su amor incondicional, su sacrificio y su constante apoyo en cada desafío. Gracias por creer en mí y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mis hermanas, por ser mi fuente de inspiración y por su ánimo y compañerismo invaluable. Vuestro cariño y aliento me han impulsado a seguir adelante, en momentos críticos.

A mis compañeros de la Universidad y amistades cercanas, por estar a mi lado en cada paso del camino, compartiendo alegrías y desafíos.

A mis profesores y mentores, por su guía, paciencia y por inculcarme el valor del conocimiento y la perseverancia.

Y, finalmente, a todas las personas que creyeron en mí y me animaron a alcanzar mis metas. Esta monografía es un reflejo del esfuerzo conjunto y del impacto positivo que cada uno de ustedes ha tenido en mi vida.

Contenido

Dedicatoria.....	1
Resumen	6
Abstract.....	7
Introducción	8
Objetivos.....	10
1.1 Objetivo general.....	10
1.2 Objetivos específicos	10
2. Capítulo. Generalidades	11
2.1 ¿Qué es un sistema de alcantarillado?	11
2.2 ¿Qué es un vehículo aéreo no tripulado (UAV)?	12
2.3 Clasificación de los UAV	12
2.4 Aplicaciones de los UAV	14
2.5 Selección de los componentes adecuados para un dron	16
2.6 Ventajas y desventajas de los UAV	17
2.7 Sensores UAV	18
2.7.1 Sensor RGB o cámara.....	19
2.7.2 Sensor o cámara multiespectral.....	19
2.7.3 Sensor hiperespectral	20
2.7.4 Sensor infrarrojo térmico.....	20
2.7.5 LIDAR.....	20
3. Capítulo. Uso de drones a nivel mundial y normatividad	21
3.1 Reglamento General del Uso de Drones en la Práctica Nacional.....	21
3.1.1 Normativa: Estados Unidos.....	21
3.1.2 Normativa Reino Unido.....	22
3.1.3 Normatividad en Francia.....	23
3.1.4 Normatividad en Alemania.....	23
3.1.5 Normativa en Canadá.....	24
3.1.6 Normatividad en Singapur.....	25

4.	Capítulo. Uso de drones en Colombia	26
4.1	Agricultura de Precisión	26
4.2	Inspección y Mantenimiento de Infraestructuras	26
4.3	Fotografía y Videografía Aérea	27
4.4	Cartografía y Fotogrametría.....	27
4.5	Seguridad	27
4.6	Respuesta a Emergencias y Desastres Naturales	27
4.7	Investigación y Conservación Ambiental.....	27
4.8	Normatividad drones en Colombia.....	28
4.8.1	Clasificación de Drones:	28
4.8.2	Requisitos Generales:.....	28
4.8.3	Operación de Drones.....	29
4.8.4	Capacitación y Certificación.....	29
4.8.5	Vuelos Comerciales	30
4.8.6	Recomendaciones	30
5.	Aplicaciones cartográficas.....	30
5.1	Gestión de datos.....	31
5.2	Generación de imágenes.....	32
5.3	Modelo digital de elevaciones y del terreno	33
5.3.1	Modelo digital de elevaciones (MDE).....	33
5.3.2	Modelo digital del terreno (MDT).....	33
5.4	Proceso de generación de ortofoto	34
5.5	Inspecciones en alcantarillados	36
5.6	Selección de tipos de drones en inspección de alcantarillados	37
5.6.1	Drones Pequeños y Ágiles:.....	37
5.6.2	Drones con Cámaras de Alta Resolución:.....	38
5.6.3	Drones con Sensores LIDAR:	38
5.6.4	Drones Multirotor y de Ala Fija:.....	39
5.7	Avance de inspecciones de alcantarillados en Colombia	39
5.7.1	Ventajas de los Drones en la Inspección de Alcantarillado	40
6.	Etapas para la obtención de un producto cartográfico	41

6.1	Planificación de la Misión	41
6.1.1	Selección del Equipo y Sensores	42
6.1.2	Definición del Área de Vuelo y Ruta	42
6.2	Recuperación de datos	46
6.2.1	Descarga de Imágenes:	46
6.2.2	Verificación y Organización:	46
6.3	Procesamiento y análisis	47
6.3.1	Procesamiento de Datos con Recap Photo de Autodesk	47
6.3.2	Procesamiento de Datos con Agisoft Metashape	49
6.3.3	Resultados de imágenes efectuadas en el informe de procesamiento en Agisoft Metashape de ejemplo de vuelo realizado en la universidad de pamplona.	52
7.	Ejemplos de aplicaciones	56
7.1	Ejemplo a nivel Nacional	56
7.1.1	Metodología	56
7.1.2	Resultados	57
7.1.3	Conclusiones	58
7.2	Ejemplo a nivel internacional	58
7.2.1	Material y métodos	60
7.2.2	Resultados	63
	Conclusiones	67

Tabla de figuras

Figura 1. Multirotor UAV	14
Figura 2. Servicios actuales de drones civiles	15
Figura 3. Diferentes tipos de drones	16
Figura 4. Motores CC sin escobillas	17
Figura 5. Ejemplo de ortomosaico	35
Figura 6. Imágenes del interior del alcantarillado	36
Figura 7. Imagen del dron volando en el colector del laminador de la Gavia	40
Figura 8. Localización de los PA y PC	50
Figura 9. Clasificación de puntos software Agisoft Metashape	51
Figura 10. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes	52
Figura 11. Gráfico de residuales para FC300S(3.61)mm	53
Figura 12. Posiciones de puntos de apoyo y estimación de errores	53
Figura 13. Modelo digital de elevaciones	54
Figura 14. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)	54
Figura 15. ORTOFOTO	55
Figura 16. Fases del procedimiento de compra pública Pre-comercial	62
Figura 17. Imagen del prototipo definitivo utilizado en la fase 3 y adjudicatario de la CPP	63
Figura 18. Imagen del dron sorteando una acometida con vertido en el lateral superior de la galería ...	64
Figura 19. Imagen de medición de una acometida del colector inspeccionado	65
Figura 20. Imagen de la modelización 3D georreferenciada de un tramo del colector Abroñigal derecho	66

Resumen

La presente monografía examina la implementación de drones en diversas aplicaciones, destacando su impacto en términos de eficiencia, seguridad y precisión en distintos sectores. Se analizan estudios de caso y proyectos piloto donde los drones han sido utilizados para la inspección de infraestructuras, monitoreo ambiental, agricultura de precisión y servicios de emergencia. En este sentido, el propósito de esta investigación es destacar la importancia de la implementación de drones en la inspección de sistemas de alcantarillado en Colombia, así como su desarrollo y avances en los últimos años.

La metodología de estudio se basó en un análisis de correlación de palabras clave, países y años, a través de VOSviewer y bibliometrix, usando la base de datos de la universidad de Pamplona para la búsqueda de artículos científicos en plataformas como como Scopus y ScienceDirect, donde se tuvo un enfoque en las aplicaciones, antecedentes, normativa y los diferentes softwares utilizados para llevar a cabo con éxito cualquier proyecto de drones, aprovechando al máximo las ventajas que esta tecnología avanzada puede ofrecer en diversas aplicaciones. Se exploran las tecnologías y metodologías empleadas para la captura y análisis de datos, incluyendo el uso de cámaras de alta resolución, sensores multiespectrales y sistemas de posicionamiento global. La investigación concluye que la adopción de drones en la inspección de alcantarillados puede optimizar la gestión de infraestructuras urbanas en Colombia, ofreciendo una solución más efectiva y segura ya que demuestra mejoras significativas en la recolección de información, reducción de costos operativos y tiempos de respuesta más rápidos.

Palabras clave: Drones, UAV, aeronaves, red de alcantarillado, software.

Abstract

This monograph examines the implementation of drones in various applications, highlighting their impact in terms of efficiency, safety and precision in different sectors. Case studies and pilot projects are analyzed where drones have been used for infrastructure inspection, environmental monitoring, precision agriculture and emergency services. In this sense, the purpose of this research is to highlight the importance of the implementation of drones in the inspection of sewage systems in Colombia, as well as its development and advances in recent years.

The study methodology was based on a correlation analysis of keywords, countries and years, through VOSviewer and bibliometrix, using the database of the University of Pamplona to search for scientific articles on platforms such as Scopus and ScienceDirect, where there was a focus on the applications, background, regulations and the different software used to successfully carry out any drone project, taking full advantage of the advantages that this advanced technology can offer in various applications. The technologies and methodologies used to capture and analyze data are explored, including the use of high-resolution cameras, multispectral sensors, and global positioning systems. The research concludes that the adoption of drones in sewer inspection can optimize the management of urban infrastructure in Colombia, offering a more effective and safe solution as it demonstrates significant improvements in information collection, reduction of operating costs and faster response times rapid.

Keywords: Drones, UAV, aircraft, sewer network, software.

Introducción

Los drones son un fenómeno social cada vez más importante. En general, se entienden como aeronaves sin personal, generalmente equipadas con cámaras que pueden controlarse de forma remota y utilizarse con fines recreativos y comerciales (Serafinelli, E, 2022)

El uso de drones ha revolucionado diversas industrias, ofreciendo una herramienta versátil y eficiente para una amplia gama de aplicaciones. Desde la agricultura de precisión, donde ayudan a monitorear cultivos y optimizar recursos, hasta la inspección de infraestructuras, donde facilitan la evaluación de estructuras sin riesgos para el personal, los drones están transformando la manera en que se realizan numerosas tareas. Además, su capacidad para llegar a lugares de difícil acceso y realizar operaciones en condiciones peligrosas, junto con su bajo coste operativo, ha incrementado su adopción en sectores como la fotografía aérea, la topografía, la seguridad y la logística. La creciente integración de drones en estos campos destaca su importancia como una tecnología emergente que mejora la eficiencia, reduce costos y aumenta la seguridad en varios campos.

En la inspección de alcantarillas las aeronaves representan un avance significativo en la gestión y mantenimiento de infraestructuras urbanas críticas. Tradicionalmente, la inspección de alcantarillas ha sido un proceso costoso, peligroso y laborioso, que involucra personal especializado y equipos pesados. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología de drones, esta tarea se ha simplificado y mejorado considerablemente.

Los drones ofrecen varias ventajas claves, en primer lugar, son capaces de acceder a áreas de difícil acceso y explorar lugares que podrían representar riesgos para los trabajadores humanos, como alcantarillas estrechas o contaminadas. Además, los drones pueden realizar

inspecciones de manera más rápida y eficiente que los métodos convencionales y mejoran la eficiencia operativa, el uso de drones en la inspección de alcantarillas también contribuye a la seguridad de los trabajadores y al cumplimiento de normativas ambientales al minimizar la exposición humana a entornos potencialmente peligrosos.

Por lo tanto, la integración de drones en la inspección de alcantarillas representa un avance tecnológico que no solo optimiza los procesos existentes, sino que también ofrece nuevas oportunidades para la gestión proactiva de infraestructuras urbanas, asegurando su funcionamiento eficiente y sostenible a largo plazo.

Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la recolección de información primaria en sistemas de alcantarillado, explorando su eficacia, aplicaciones y contribuciones a la gestión y mantenimiento de infraestructuras urbanas.

1.2 Objetivos específicos

- Describir la clasificación, aplicaciones y selección de componentes adecuados para UAV en el contexto de sistemas de alcantarillado, destacando ventajas y desventajas, y la importancia de los sensores especializados.
- Comparar el reglamento del uso de drones en algunos países, destacando las similitudes y diferencias en las normativas aplicables a nivel nacional.
- Examinar el uso de drones para aplicaciones cartográficas y la inspección de alcantarillados, enfocándose en la reglamentación vigente, el proceso de generación de productos cartográficos y las ventajas específicas de los drones en la inspección de infraestructuras subterráneas.

2. Capítulo. Generalidades

2.1 ¿Qué es un sistema de alcantarillado?

Un sistema de alcantarillado es una red de drenaje compuesta por alcantarillas, colectores y canales superficiales o abiertos que drenan las aguas pluviales y residuales urbanas. Un sistema de alcantarillado en general está compuesto por una o más cuencas hidrográficas (cuenca de drenaje) cuyas características dependen fuertemente de la topografía del área.

En cuencas hidrográficas separadas, una alcantarilla pluvial está diseñada para transportar solo aguas pluviales, escorrentía superficial o drenaje de la calle, mientras que una alcantarilla sanitaria transporta desechos líquidos y transportados por agua de residencias, edificios, instalaciones industriales e instituciones. En las cuencas hidrográficas combinadas, las alcantarillas transportan tanto aguas pluviales como residuales. Dado que se mezclan entre sí mientras fluyen por la misma tubería, las aguas pluviales se contaminan de alguna manera con aguas residuales de alcantarillado combinado (Leirens et al.2010)

Los sistemas de tuberías de alcantarillado son componentes esenciales de los servicios públicos subterráneos: los "vasos sanguíneos" en las ciudades para brindar servicios urbanos. En muchos países, la mayoría de los sistemas de tuberías de alcantarillado sufren varios defectos debido a su largo historial de servicio de 30 a más de 100 años. Esos defectos pueden acelerar el deterioro de la tubería y provocar varios problemas, como desbordamientos de alcantarillado sanitario , afluencia e infiltración, así como sumideros (Wang, Kumar y Cheng, 2021).

2.2 ¿Qué es un vehículo aéreo no tripulado (UAV)?

Los UAV son aeronaves de tamaño pequeño, que pueden volar de forma autónoma, controladas remotamente por computadoras, por personal o por una combinación de las anteriores. Inicialmente desarrollados para operaciones que involucran las fuerzas armadas, y con el paso del tiempo se ha ido implementando el uso en una variedad de aplicaciones civiles utilizando principalmente la fotografía como técnica de detección. Los UAV tienen la capacidad de acelerar el proceso de medición óptico para infraestructura civil, ofreciendo una mayor accesibilidad y reduciendo la interferencia con el tráfico local. Los estudios han abordado los problemas de cómo los UAV pueden influir en la calidad de la foto, ya que las cámaras son la plataforma de detección más común implementada. Además, las cámaras infrarrojas se han integrado y utilizado para detectar defectos en paneles solares fotovoltaicos, ya que pueden identificar rápidamente puntos calientes y documentar celdas o conexiones potencialmente defectuosas. Se han logrado varias mejoras en la utilización de UAV para realizar inspecciones en estructuras de ingeniería civil. Es de esperar que los avances en la tecnología de sensores de imagen permitan obtener resultados cada vez más precisos y con más equipos móviles (Reagan, Sabato y Niezrecki, 2018).

2.3 Clasificación de los UAV

Actualmente, hay variedades de drones disponibles en el mercado y el precio del dron varía según las características/funcionalidades que ofrecen los drones. Para un nuevo participante/novato en este campo, se vuelve difícil seleccionar los drones correctos/apropiados para aplicaciones específicas entre los drones disponibles (Vishwath, et al, 2022)

Los UAV se clasifican en función de su peso, nivel de autonomía y altitud . Por ejemplo, los UAV pequeños, como el DJI Phantom 4 Pro, tienen una capacidad de batería aproximada de

5 Ah, y los UAV grandes, como los UAV militares, tienen una capacidad de batería aproximada de 30 Ah. Los vehículos aéreos no tripulados dependen principalmente de baterías de litio para su funcionamiento debido a la baja tasa de autodescarga y la alta densidad de energía. Sin embargo, con el tiempo, las baterías de los UAV se degradan. Esto podría generar muchos problemas, incluidos retrasos en los vuelos, accidentes forzados y pérdidas de conexión. Por lo tanto, la operación confiable de los UAV puede verse obstaculizada debido a fallas en la batería o al agotamiento de la batería. En consecuencia, la degradación de la batería en los vehículos aéreos no tripulados puede ser costosa. Por lo tanto, se requiere un sistema de administración de batería (BMS) confiable para operar UAV de manera eficiente (Shibl, Ismail y Massoud, 2023).

En términos generales, estas aeronaves se pueden clasificar en dos partes principales en función de su estructura y funcionalidad: más ligeros pesados que el aire. Por otro lado, los vehículos aéreos no tripulados más pesados que el aire se pueden clasificar en dos partes: vehículos aéreos no tripulados impulsados por motor y sin motor. Los UAV no motorizados son básicamente planeadores no tripulados. Los UAV impulsados por energía pueden ser de tres tipos: de ala fija, de ala giratoria y biomimetismo. Mientras que los UAV de ala fija dependen del aeródromo para el despegue y aterrizaje o el lanzamiento de proyectiles, los UAV de ala giratoria dependen de su rotor para el despegue y aterrizaje vertical. Según el número de rotores, el ala giratoria se puede clasificar de manera diferente. Por ejemplo, el helicóptero no tripulado, el tricóptero, el cuadricóptero, el hexacóptero y el octocóptero tienen dos, tres, cuatro, seis y ocho rotores respectivamente. Finalmente, los UAV de biomimética son la nueva incorporación a la familia de UAV. Estos vehículos aéreos no tripulados imitan el comportamiento de vuelo de insectos o pájaros para completar una determinada misión. Los vehículos aéreos no tripulados

de ala fija se enfrentan a dificultades cuando necesitan despegar, girar o maniobrar en lugares confinados, como entornos interiores o urbanos (Alam y Oluoch, 2021).

Figura 1. Multirotor UAV



Nota. Tomado de Md Shah Alam, Jared Oluoch, *A survey of safe landing zone detection techniques for autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs)*, *Expert Systems with Applications*, Volume 179, 2021.

2.4 Aplicaciones de los UAV

Las aplicaciones de los UAV aumentan día a día en los más diversos campos tanto con fines civiles como militares. En el caso de aplicaciones civiles, los vehículos aéreos no tripulados ahora se utilizan para diversos trabajos agrícolas, como análisis de suelos, plantación, riego, fumigación con agua y pesticidas. Varios campos de la ingeniería también dependen de los UAV para recopilar datos sobre la evaluación del riesgo sísmico, el transporte, la gestión de la construcción, la topografía y el mapeo, y el monitoreo y la evaluación de inundaciones. Los UAV también se utilizan para mapear ubicaciones, entorno de modelado y monitoreo, exploración de recursos como minería, mapeo de pozos, entrega de medicamentos y otros servicios. En aplicaciones militares, los UAV se utilizan para vigilancia, seguridad, protección de

fronteras, reconocimiento ataques armados y objetivos para entrenamiento militar (Alam y Oluoch, 2021).

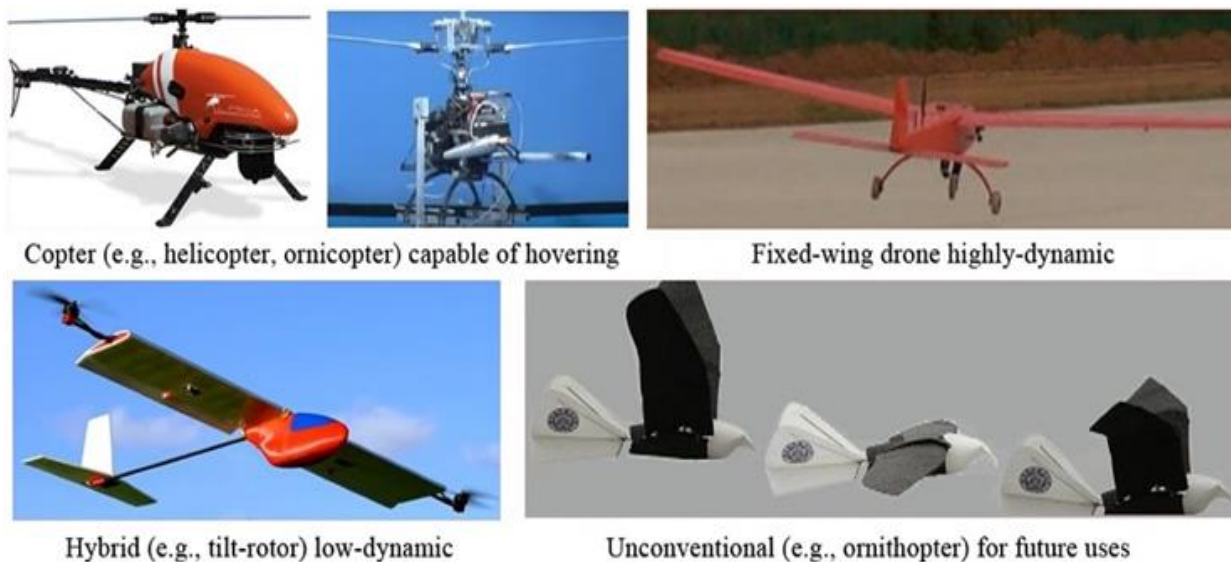
Las áreas de aplicaciones de drones incluyen topografía y mapeo, monitoreo de progreso, monitoreo de seguridad y mantenimiento de activos. En diferentes servicios, los drones se operan en diversos entornos (que van desde espacios confinados hasta espacios aéreos abiertos que cubren miles de kilómetros cuadrados), que están relacionados con las misiones de dichos servicios. Estos entornos se clasifican en espacios urbanos para servicios industriales y humanitarios, espacios suburbanos para servicios agrícolas y de entrega, y espacios aéreos para servicios de inspección. Cada entorno tiene la velocidad máxima del viento y una densidad de población específica, que tienen una alta influencia en los drones (Huang, 2023)..

Figura 2. Servicios actuales de drones civiles



Nota. Tomado de Mingyang Huang, *Research on modelling accuracy and test validation for biomimetic flapping-wing drone*, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2023

Figura 3. Diferentes tipos de drones



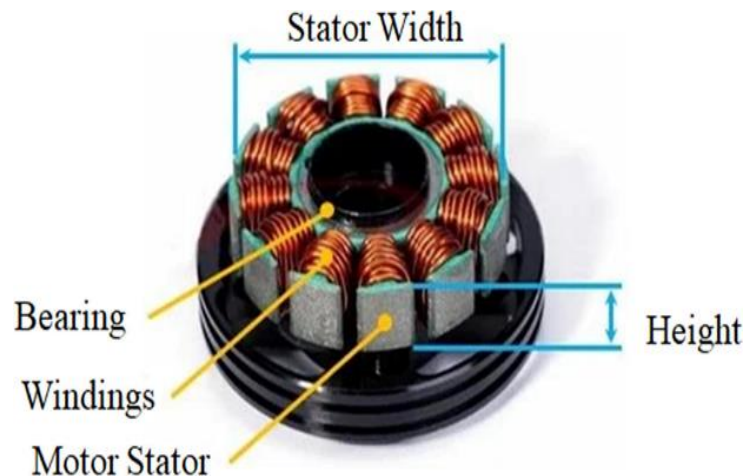
Nota. Tomado de Mingyang Huang, *Research on modelling accuracy and test validation for biomimetic flapping-wing drone*, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2023

2.5 Selección de los componentes adecuados para un dron

- **Baterías:** LiPo o polímero de litio tiene una clasificación de alto vatio/peso y entrega una gran cantidad de corriente, por lo que sería la opción adecuada para una aplicación determinada.
- **Hélice :** Las hélices tienen dos números de identificación en su parte superior. El número de identificación indicado primero es el diámetro de la hélice en pulgadas y el segundo número de identificación es el paso de la hélice en pulgadas. Estos números de identificación suelen estar grabados en la parte superior de la hélice.
- **Motor:** El posible sistema de propulsión para impulsar las hélices podría ser motores de combustible, motores con escobillas y motores sin escobillas. Pero el

motor eléctrico sin escobillas se ha utilizado ampliamente debido a su facilidad de disponibilidad y al medio ambiente.

Figura 4. Motores CC sin escobillas



Nota. Tomado de Ajay Vishwath N.C., Arvind R Yadav, Deep Mehta, Jatin Belani, Ravi Raj Chauhan, *A guide to novice for proper selection of the components of drone for specific applications, Materials Today: Proceedings*, Volume 65, Part 8, 2022.

- *ESC (controlador electrónico de velocidad)*: la consideración principal para elegir un ESC sería la corriente, el voltaje y la necesidad de un BEC- Circuito de Eliminación de Batería.(Ajay Vishwath.et al, 2022)

2.6 Ventajas y desventajas de los UAV

El uso de UAV pequeños tiene muchas ventajas en comparación con los sistemas de vuelo tripulados u otras unidades de inspección específicas. Los UAV solo necesitan un operador en tierra para controlar el vuelo y la cámara. Se pueden utilizar en situaciones de alto riesgo sin poner en peligro vidas humanas. Muchos sistemas de vuelo se basan en tecnologías de bajo coste, pero alcanzan un alto nivel de complejidad para aplicaciones profesionales. Otra ventaja es

la capacidad de adquisición rápida de datos reales y almacenamiento de estos en vuelos relevantes. Por lo tanto, generan costos más bajos en comparación con las unidades de inspección grandes e intensivas en personal. Con características inteligentes como el control por GPS- Sistema de Posicionamiento Global, los UAV son fáciles de manejar para el piloto.

A pesar de todos estos beneficios, los UAV tienen algunas limitaciones esenciales, que limitan el uso de estos sistemas. Debido a la pequeña carga útil, solo las cámaras compactas digitales ligeras y de pequeño formato se pueden utilizar para la documentación fotográfica o de vídeo. Además, la carga útil limitada solo permite paquetes de baterías pequeños, lo que provoca un tiempo de vuelo corto. Debido al bajo peso, el sistema de vuelo es sensible a algunos cambios de clima, como por ejemplo cuando se presentan vientos fuertes pues se dificulta el vuelo. Situaciones de vuelo inesperadas o fallas en la señal GPS provocan un cambio del modo de vuelo automático al modo manual, lo que requiere un piloto bien entrenado para manejar esas situaciones críticas. Actualmente, los UAV no cuentan con un sistema eficaz para evitar colisiones. Otros límites están dados por las regulaciones de las autoridades civiles y de seguridad. A menudo, se requiere un permiso de vuelo y los vuelos autónomos están prohibidos; hay una restricción para vuelos en la línea de visión (Morgenthal y Hallermann, 2014).

2.7 Sensores UAV

Dentro de la recopilación de información basada en UAV, se recopilan tres tipos de información, como transmisión de video, telemetría e información auxiliar . Para la información de telemetría que es registrada por el sensor GPS o INS (marco de navegación inercial), se representan con un contorno de referencia distintivo y, por lo tanto, requieren vestimenta formal . Además, para recoger GCP- Puntos de Control Terrestres bien simbolizados para mover el marco de UAV o la estimación de precisión de la ortoimagen hecha, el

USGS DEM(Digital Height Show) y la imagen de referencia USGS DOQQ (Digital Orthophoto Quarter Quadrangle). Estos son diversos tanto en el esquema como en la determinación que deben registrarse conjuntamente para que la estimación inteligente de 3D GCPS (Marco de puntos de vista del clima global) pueda ser ejecutado.

Básicamente, el UAV se basa en cinco sensores;

2.7.1 *Sensor RGB o cámara*

Existen numerosas gamas de cámaras disponibles que se utilizan en diversas aplicaciones. La buena selección de cámaras para la instalación de drones es una de las claves de la victoria. Hay algunos parámetros que se deben cumplir en el momento de la selección de cámaras. Esto incluye el punto focal (mejor punto focal con menos mutilaciones geométricas), la determinación de la cámara y la calidad de los chips del dispositivo de par cargado (CCD)/semiconductor de óxido de metal complementario (CMOS) (medida de píxeles y nivel de ruido) (Laghari, et al, 2023)

2.7.2 *Sensor o cámara multiespectral*

Las cámaras multiespectrales son ligeras. Son uno de los sensores vitales comúnmente utilizados en la expansión de las cámaras RGB- Red, Green, Blue, dentro de la familia de sensores UAV. El trabajo de este sensor es para expertos en vegetación y agroindustria. Esta cámara se utiliza para ver el nivel del agua en granjas, como la evaluación de enfermedades a nivel de la hoja. Una cosa increíblemente buena sobre el sensor multiespectral es recoger información con alta determinación (mucho mejor que 30 cm Ground Testing Separate (GCD)) que normalmente no es factible en multiespectral convencional. Se distingue de las cámaras RGB, por regla general, las cámaras multiespectrales vienen con mayores alcances debido al

equipo adicional que se requiere para conectar grupos adicionales a los grupos RGB (Laghari, et al, 2023)

2.7.3 *Sensor hiperespectral*

Los sensores hiperespectrales se utilizan para capturar imágenes con cientos de grupos límite (capacidad de transmisión de 5 a 10 nm). La mayoría de los sensores hiperespectrales son cámaras de racimo directas. Los sensores hiperespectrales capturan grandes volúmenes de datos que son muy valiosos para numerosas aplicaciones. La determinación de las imágenes adquiridas puede alcanzar niveles de hasta 2 cm a 5 cm o menos (Laghari, et al, 2023)

2.7.4 *Sensor infrarrojo térmico*

El sensor es, además, ligero. Estos son de los sensores inactivos de rango medio cuya longitud de onda está entre (3um a 35um). Se utilizan principalmente en medidas de temperatura y estimación de flujos térmicos. Una cuestión fundamental de la temperatura del motor y el aseguramiento de la emisividad es a través de la concentración y su transporte. El uso de sensores térmicos se utiliza regularmente en tiempo real con una elección anterior de la tasa de captura calificada . La información térmica se puede utilizar para numerosas aplicaciones agrarias y naturales y otras utilizan la cámara térmica (Laghari, et al, 2023)

2.7.5 *LIDAR*

Estos sensores son conocidos como una forma más exacta de recoger información geométrica . Estos sensores se utilizan ampliamente en el servicio de guardabosques, el legado social y el modelado de datos de construcción.(BIM). El portátil, el mundo académico y el LIDAR terrenal en estos días se han creado tanto en la industria como en la comunidad académica. Los sensores GPS o IMU (Unidad de Medición Inercial) en los UAV a menudo se

equivocan en la determinación del sensor, por lo que el escenario también es más inestable cuando vuela. De esta manera, de hecho, con sensores LIDAR livianos bien calibrados, la precisión de las nubes por razón común es generalmente baja. Se detalla que los marcos LIDAR transmitidos por UAV profundamente precisos generalmente vienen con estaciones GPS diferenciales. Donde las estimaciones de GPS de alta precisión se pueden obtener. La búsqueda de sensores LIDAR- Light Detection and Ranging, es generalmente baja (Laghari, et al, 2023).

3. Capítulo. Uso de drones a nivel mundial y normatividad

El empleo de aeronaves ha ido creciendo intensamente a nivel mundial, y se ha utilizado de diversas formas en diferentes aspectos. El uso tan grande de drones contamina también al sector público. Fácilmente podemos nombrar muchos casos en los que los UAS se utilizan con fines militares con un alto nivel de eficiencia y para algunos fines de control y monitoreo estatal. Así, podemos distinguir dos áreas principales de uso de drones: civil (comercial y recreativa) y pública.

3.1 Reglamento General del Uso de Drones en la Práctica Nacional

3.1.1 Normativa: Estados Unidos

La Administración Federal de Aviación emitió en 2016 la Reglamentación sobre aeronaves pequeñas no tripuladas (SUAR) como parte del Reglamento Federal de Aviación . Según SUAR las aeronaves no tripuladas (UAS) deben pesar menos de 55 libras. (25kg). Velocidad máxima: 100 mph, máx. altitud: 400 pies, visibilidad meteorológica mínima: 3 millas desde la estación de control. Quedan prohibidos los vuelos sobre áreas restringidas o sobre cualquier persona ajena a la operación de UAS. Para operar un vuelo UAS, un operador debe tener un certificado de aviador de piloto remoto. Para ser calificado como

piloto remoto, una persona debe tener al menos 16 años, demostrar conocimientos aeronáuticos adecuados para operar UAS y completar un pequeño curso de capacitación en línea para obtener el certificado. Todos los drones que caen bajo las disposiciones de SUAR (excepto los modelos muy pequeños sin cámaras (menos de 0.55 libras)) deben registrarse en la FAA. La FAA publica en su sitio web información sobre áreas restringidas para UAS (aeropuertos, espacios aéreos de uso especial, eventos deportivos, incendios forestales, etc.) y toda la información sobre cómo registrar drones y obtener o renovar el certificado de piloto remoto (Bundin M, et al,2020)

3.1.2 Normativa Reino Unido

La explotación de drones está regulada por The Air Navigation Order 2016 y las Regulaciones que contienen en el art. 94 y 95 reglas especiales relativas a las aeronaves pequeñas no tripuladas ('cualquier aeronave no tripulada, que no sea un globo o una cometa, que tenga una masa de no más de 20 kg sin su combustible') [9]. Los UAS que pesan menos de 250 g generalmente están excluidos del alcance de las Regulaciones. Las aeronaves no tripuladas más grandes (más de 20 kg) se rigen por la Orden de navegación aérea del Reino Unido. La CAA (Autoridad de Aviación Civil) podría hacer posibles exenciones de ciertos requisitos. El Reglamento distingue varios tipos de uso de UA (basados en el propósito general): uso recreativo, uso comercial, uso de aviones modelo, uso de aviones más grandes. El uso de UA modelo y recreativas por parte de individuos está sujeto a registro que se puede realizar en línea y un operador debe tener una identificación de operador (menores de 18 años) y una identificación de viajero (menores de 13 años). En ambos casos, una persona debe pasar una prueba teórica en línea para obtener la identificación requerida. Está prohibido volar sin registro e identificación (los pasajeros menores de 13 años pueden usar UA bajo la supervisión de un operador). El uso comercial de drones también debe declararse y registrarse (el permiso se emite

por 1 año y está sujeto a renovación). La organización que utiliza UA comerciales es responsable de que los drones sean operados solo por una persona que tenga la competencia adecuada de piloto remoto (pasar una prueba de vuelo). En todos los casos, los drones deben estar etiquetados con ID de Operador (una pegatina en la UA). Normalmente, los aviones pequeños no tripulados pueden volar sin un permiso especial a menos de 400 pies sobre la tierra. Las restricciones se refieren a los casos de uso sobre grandes reuniones de personas, torres de control, embarcaciones o vehículos que no están bajo el control del operador (Bundin M, et al,2020)

3.1.3 Normatividad en Francia

El proveedor francés de servicios de navegación aérea (DSNA) en 2018 operó alrededor de 3 millones de vuelos IFR y la misma cantidad de vuelos VFR [29]. DSNA ya admite miles de vuelos de drones, lo que convierte al espacio aéreo francés en uno de los más activos de Europa. Francia participa en varias iniciativas de la UE para regular y desarrollar la navegación de drones, dos de ellas son las más prometedoras: CORUS, el proyecto tiene como objetivo gestionar drones de forma segura en niveles muy bajos (VLL) de la atmósfera) y USIS (Servicio Inicial U-space, tiene como objetivo crear asistencia automatizada para operar y controlar el tráfico aéreo de forma segura (Bundin M, et al,2020)

3.1.4 Normatividad en Alemania

De acuerdo con la Regulación Aérea Alemana [19] la operación de Sistemas de Aviación No Tripulados (UAS) está sujeta a autorización. Reglas especiales deben En general, se prohíbe cualquier operación de vehículos aéreos no tripulados que esté fuera de la vista del operador o con una masa total de más de 25 kg. Las aeronaves no tripuladas no podrán ascender en áreas restringidas. Los encargados de emitir un permiso son las autoridades de aviación terrestres. El permiso (llamado permiso de ascensión) se puede otorgar si la autoridad aeronáutica competente

ha determinado que el uso previsto del sistema aéreo no tripulado no crea un riesgo para la seguridad del tránsito aéreo o la seguridad o el orden público. El gobierno federal y los estados cuentan con normas uniformes para la armonización de la actuación administrativa. Estos “principios comunes de los gobiernos federal y estatal para otorgar permisos de levantamiento en drones se incluyeron en el Lector para operadores. Por lo tanto, el permiso emitido por una de las autoridades de tierras y es válido en toda la Federación por hasta 2 años. No obstante, se observarán los requisitos y procedimientos especiales de los respectivos territorios federales. Normalmente todos los vuelos de más de 100 m están prohibidos. los requisitos y procedimientos especiales que se observarán en los respectivos territorios federales. Normalmente todos los vuelos de más de 100 m están prohibidos. los requisitos y procedimientos especiales que se observarán en los respectivos territorios federales. Normalmente todos los vuelos de más de 100 m están prohibidos (Bundin M, et al,2020)

3.1.5 Normativa en Canadá

Canadá presenta mayor avance en la regulación de UAS Los pilotos remotos de drones deben tener un certificado válido y operar solo UAS especialmente marcados y registrados. Un dron de menos de 250 gramos, no está sujeto a registro ni a obtener un certificado de piloto de dron para operarlo. Pero se recomienda al propietario operar este dron de manera responsable, tomando las precauciones necesarias de seguridad. Los UAV más grandes que pesan más de 25 kg deben obtener un permiso especial de Transport Canada. Para la mayoría de drones (250 ga - 25 kg) las reglas de operación difieren del nivel básico y avanzado de su uso. Las operaciones básicas incluyen vuelos que no excedan los 30 m sobre la tierra, en un espacio aéreo no controlado y no por encima de los transeúntes; de lo contrario, cada vuelo se considerará como

una operación avanzada de UAS. La operación de UAV está sujeta incluso a responsabilidad disciplinaria por incumplimiento de normas o registro o privacidad de los ciudadanos. en un espacio aéreo no controlado y no por encima de los transeúntes; de lo contrario, el vuelo completo se considerará una operación avanzada de UAS. El operador de este último debe cumplir con algunos requisitos extendidos no solo para tener un certificado de piloto remoto o registrar el dron, sino también para tener una revisión de piloto y obtener el permiso para operar el vuelo en los límites de tiempo y espacio establecidos (Bundin M, et al,2020)

3.1.6 Normatividad en Singapur

Todos los UAS que excedan el peso de 250 g están sujetos a registro. El solicitante debe tener al menos 16 años. El registro incluye: la obtención de la etiqueta de registro con una identificación única que debe adherirse a la aeronave y completar el formulario de registro en línea que difiere del estado legal del solicitante: personas físicas, organizaciones y turistas. La persona debe dar de baja el UAS en caso de pérdida, fuera de servicio permanente o venta a otro propietario.

La regulación distingue al menos 3 esferas principales de actividad para la operación de UAS según su propósito: Actividad 1 - propósito de recreación (disfrute, relajación, competencia modelo); Actividad 2: propósito educativo (conferencia, tutorial, seminario con demostración de UAS); Actividad 3 - propósito no recreativo y no educativo (cualquier actividad empresarial, comercial o excesiva). El permiso para operar UAS se necesita según el tipo de actividad y algunos otros criterios:

- para cualquier actividad 3 independientemente de la masa de UAS;
- para la actividad 2 si el UAS pesa más de 7 kg;

- para la actividad 1 si el UAS pesa más de 25 kg;
- para cualquier actividad en BVLOS.

El permiso depende en gran medida de la actividad y se prevén los requisitos más estrictos (en cuanto a zonas restringidas y altitud de vuelos) para la actividad 3 y vuelos BVLOS. La regulación más detallada se refiere a las operaciones BVLOS que se dividen en tres grupos de riesgo según las condiciones y circunstancias del vuelo (principalmente alto riesgo: operación sobre personas no involucradas). Para cada grupo de riesgo existen requisitos específicos de hardware y software para los sistemas UAS (gestión de fallas, comunicación, navegación/control de vuelo, detección y prevención). (Bundin M, et al,2020)

4. Capítulo. Uso de drones en Colombia

El uso de drones en Colombia ha estado impulsado por las múltiples aplicaciones que ofrecen estos dispositivos en diversos sectores. A continuación, se detallan algunas de las áreas más destacadas en las que se emplean drones en el país:

4.1 Agricultura de Precisión

Los drones se utilizan ampliamente en la agricultura para monitorear cultivos, evaluar el estado del suelo y las plantas, y gestionar recursos como agua y fertilizantes. Mediante cámaras multiespectrales e infrarrojas, los agricultores pueden obtener datos precisos que les permiten optimizar sus prácticas y aumentar la productividad.

4.2 Inspección y Mantenimiento de Infraestructuras

En Colombia, los drones se emplean para inspeccionar infraestructuras críticas como puentes, carreteras, líneas eléctricas y oleoductos. Estos dispositivos permiten realizar

inspecciones de manera más segura y eficiente, reduciendo el riesgo para los trabajadores y proporcionando datos detallados sobre el estado de las estructuras.

4.3 Fotografía y Videografía Aérea

Estos dispositivos se utilizan para capturar imágenes y videos impresionantes para la industria del entretenimiento, el turismo, el inmobiliario y los medios de comunicación.

4.4 Cartografía y Fotogrametría

Los drones se utilizan para crear mapas detallados y modelos 3D del terreno, de aquí se deriva la importancia de la planificación urbana, gestión de recursos naturales y la investigación geográfica. Las imágenes aéreas obtenidas se procesan mediante software especializado para generar orto mosaicos y otros productos cartográficos.

4.5 Seguridad

Los drones se emplean para vigilancia de áreas extensas, monitoreo de eventos multitudinarios y patrullaje por zonas rurales y urbanas. Estos dispositivos permiten una vigilancia discreta y continua, mejorando la capacidad de respuesta ante incidentes.

4.6 Respuesta a Emergencias y Desastres Naturales

Los drones son herramientas valiosas en situaciones de emergencia y desastres naturales, como inundaciones, terremotos y deslizamientos de tierra. Permiten evaluar rápidamente el alcance de los daños, identificar áreas de riesgo y coordinar las labores de rescate y ayuda humanitaria.

4.7 Investigación y Conservación Ambiental

Los drones se utilizan para monitorear la biodiversidad, realizar estudios de fauna y flora, y vigilar áreas protegidas. En Colombia, con su vasta diversidad ecológica, estos dispositivos

ayudan a los investigadores y conservacionistas a recopilar datos cruciales sin perturbar el entorno natural.

4.8 Normatividad drones en Colombia

La Resolución número 01983 del 27 de septiembre de 2023, contenida en el RAC 100, establece la normativa vigente para la operación de drones en Colombia. A continuación, se presentan los puntos más relevantes de esta resolución:

RAC 100 - Resolución 01983 de 2023

4.8.1 Clasificación de Drones:

- **Micro:** Peso máximo al despegue (MTOW) menor o igual a 250 gramos.
- **Pequeño:** MTOW mayor a 250 gramos y menor o igual a 25 kg.
- **Mediano:** MTOW mayor a 25 kg y menor o igual a 150 kg.
- **Grande:** MTOW mayor a 150 kg.

4.8.2 Requisitos Generales:

Registro:

- Todos los drones deben ser registrados ante la Aerocivil.
- El registro debe incluir datos del operador y las características del dron.

Seguro:

- Obligatorio para drones de todas las categorías.
- Debe cubrir daños a terceros y a la propiedad.

Permisos de Operación:

- Los drones requieren un permiso de operación específico.
- Los permisos deben ser solicitados detallando el propósito del vuelo y las medidas de seguridad a implementar.

4.8.3 Operación de Drones

Altura Máxima:

Es de 120 metros sobre el nivel del suelo, a menos que se obtenga una autorización especial.

Distancia Máxima:

Los drones deben volar a una distancia visible para el operador.

Zonas Restringidas y Prohibidas:

- Prohibido volar sobre áreas pobladas, infraestructuras críticas, aeropuertos, bases militares, y otras zonas sensibles sin la debida autorización.
- Es necesario coordinar con las autoridades pertinentes para volar en espacio aéreo controlado.

4.8.4 Capacitación y Certificación

- Los operadores deben recibir capacitación y certificación por parte de entidades reconocidas por la Aerocivil.
- La capacitación incluye conocimientos en operación segura, normativa aplicable, y medidas de emergencia.

4.8.5 Vuelos Comerciales

- Los vuelos comerciales requieren una autorización específica de la Aerocivil.
- La solicitud debe incluir un plan detallado de la operación, incluyendo las medidas de seguridad.

4.8.6 Recomendaciones

- Es fundamental que cualquier operador de drones en Colombia se mantenga actualizado con la normativa vigente, consultando directamente la página web de la Aerocivil o contactando a las autoridades competentes.
- Se recomienda realizar un seguimiento continuo de las actualizaciones en la regulación, ya que estas pueden cambiar en respuesta a nuevas tecnologías o incidentes de seguridad.

5. Aplicaciones cartográficas

Las imágenes satelitales y los mapas GIS derivados de satélites, que hace poco más de una década requerían costosos vuelos tripulados de imágenes en aviones o helicópteros, visitas a agencias de mapeo o simplemente eran imposibles de obtener o crear, ahora son ampliamente accesibles.

La creación de imágenes, mapas y modelos topográficos metódicos está calibrada principalmente para aplicaciones en agricultura, silvicultura, minería, construcción y sectores relacionados. En estos contextos, se pueden capturar áreas de hasta 40 hectáreas (basadas en la tecnología de batería actual) como datos ópticos, infrarrojos cercanos o térmicos para una

variedad de análisis que incluyen cobertura vegetal, saturación del suelo, calidad del agua y movimiento de la Tierra. (Karl Kullman,2018).

Los drones facilitan la inspección visual de infraestructuras como carreteras, puentes, líneas de transmisión eléctrica y tuberías. Utilizando técnicas de fotogrametría, los drones pueden capturar múltiples imágenes desde diferentes ángulos para generar modelos tridimensionales precisos de edificios, monumentos u otros objetos. Las imágenes obtenidas pueden ayudar a identificar daños, desgastes o áreas de riesgo potencial, permitiendo intervenciones tempranas y mantenimiento preventivo.

Los drones permiten realizar un seguimiento preciso del progreso de obras y proyectos de construcción. Esto incluye la supervisión del avance físico, la verificación de la conformidad con los diseños y la gestión eficiente de los recursos.

5.1 Gestión de datos

Un logro importante en el momento de recopilar información a partir de drones, es la obtención de modelos digitales del terreno - DTM, que finalmente permiten la creación de productos cartográficos de forma fiable, eficiente, precisa, económica y rápida (William Benigno Barragan Zaque, et al, 2019)

El mapeo de grandes áreas con múltiples UAS requiere una adecuada gestión de datos basada en protocolos estandarizados, no solo para adquisición de datos sino también para el almacenamiento, procesamiento y respectivos resultados.

Se deben realizar controles de calidad preliminares de los datos adquiridos para garantizar una calidad de imagen suficiente y la integridad de los datos. Estos controles

preliminares deben realizarse después de cada vuelo para poder repetir la misión (o solo parte de ella) en caso de datos incompletos o de calidad inadecuada.

5.2 Generación de imágenes

Las imágenes capturadas después de cada misión de batería individual deben procesarse lo antes posible. Si hay una conexión rápida a Internet en el área afectada, las imágenes se pueden enviar de inmediato a un centro de procesamiento de datos remoto equipado con una o más computadoras de escritorio de alto rendimiento. De lo contrario, las imágenes deben procesarse en la base operativa in situ. Idealmente, cada equipo debe estar formado por tres personas para optimizar el tiempo. En particular, debe incluir al piloto, al operador de carga útil y a un tercer miembro necesario para realizar una eventual verificación preliminar de datos y para la transferencia física de datos, mientras que los otros dos miembros continúan la misión. Por lo tanto, son esenciales múltiples tarjetas SD y soportes de memoria externa, que garantice la copia de datos con seguridad. (Martina Mandirola, et al, 2021)

Después de la recolección de datos, estos se exportan a un software que tenga la capacidad de realizar procedimientos fotogramétricos y genere como resultado la nube de puntos, esta nube permite crear superficies para un posterior análisis de terreno. Finalmente generados los modelos, se exportan a un software de modelado y diseño.

Actualmente, existen varios programas avanzados y ampliamente utilizados para generar ortomosaicos a partir de datos capturados por drones. Estos programas ofrecen diversas funciones para procesar imágenes y generar productos geoespaciales de alta precisión, logrando obtener ortomosaicos y MDT, algunos de estos programas son Agisoft y Recap Photo. Ambos programas son potentes y efectivos para el procesamiento de datos fotogramétricos, y la elección entre ellos dependerá de las

necesidades específicas del proyecto, el entorno de trabajo y la familiaridad con otros productos de software

5.3 Modelo digital de elevaciones y del terreno

Estos tipos de modelos digitales son utilizados en el ámbito de la cartografía para representar características del relieve terrestre.

5.3.1 Modelo digital de elevaciones (MDE)

Es un paradigma matemático tridimensional que simboliza la superficie de la Tierra, incluyendo la elevación del terreno y cualquier objeto sobre él (como edificios, árboles, etc.), así como la profundidad de cuerpos de agua si se considera en la captura de datos.

Un MDE incluye datos de elevación para cada punto en una malla regular (raster), donde cada celda (píxel) tiene asociada una coordenada x, y y un valor z que representa la elevación sobre el nivel del mar o sobre una referencia geodésica específica.

Los MDE se utilizan en aspectos como planificación urbana, ingeniería civil, gestión de recursos naturales, evaluación de riesgos naturales (por ejemplo, inundaciones), y la cartografía en general. Son esenciales para generar perfiles topográficos, calcular pendientes, y modelar la superficie terrestre con precisión.

5.3.2 Modelo digital del terreno (MDT)

Este simboliza la superficie del terreno natural, excluyendo cualquier elemento construido o vegetación. En otras palabras, simboliza la forma y características del terreno sin incluir los objetos superficiales (como edificios o árboles).

Similar al MDE, un MDT se presenta en forma de malla regular (ráster) con valores de elevación que solo reflejan la topografía natural del terreno, ignorando cualquier estructura o vegetación que pueda estar presente.

Los MDT son fundamentales en aplicaciones como la geomorfología, la modelización hidrológica, la planificación de rutas de transporte y la generación de mapas de curvas de nivel. Son útiles para análisis detallados de la forma del terreno y para estudios geológicos y ambientales.

El MDE incluye todos los objetos presentes en la superficie (naturales y artificiales), mientras que el MDT se centra exclusivamente en el terreno natural.

Estos modelos son herramientas cruciales en la cartografía moderna, proporcionando información detallada y precisa sobre las características del relieve para una amplia gama de aplicaciones científicas y prácticas.

5.4 Proceso de generación de ortofoto

Una ortofoto es una imagen que ha sido corregida para eliminar las deformaciones causadas por la perspectiva y la inclinación del terreno. Esto se logra mediante técnicas de fotogrametría, donde se ajustan los píxeles de la imagen para que representen con precisión la superficie terrestre en una proyección cartográfica.

Las ortofotos tienen alta precisión espacial, ya que cada píxel está georreferenciado con coordenadas precisas en el sistema de referencia espacial utilizado. Esto permite mediciones exactas de distancias, áreas y características geográficas en la imagen.

El proceso para generar una ortofoto implica los siguientes pasos:

- **Captura de Imágenes:** Se capturan imágenes aéreas o satelitales con cámaras específicas que registran información detallada del terreno.
- **Corrección Geométrica:** Se aplican técnicas de fotogrametría para corregir la perspectiva y los efectos del relieve, utilizando puntos de control y modelos digitales de elevación (MDE o MDT).
- **Georreferenciación:** Cada píxel de la ortofoto se asigna a coordenadas geográficas precisas, asegurando su alineación exacta con el sistema de referencia utilizado.
- **Mosaico y Edición:** Se combinan y ajustan las imágenes individuales para crear una imagen continua y coherente del área cubierta, eliminando bordes visibles y otros artefactos.

Un ejemplo de A ortomosaico después de unir y B un mapa que luego se puede pasar a los equipos de campo con cuerpos de agua resaltados (rojo) y rutas de acceso y ubicaciones. Tomado con permiso de Hardy et al.

Figura 5. Ejemplo de ortomosaico



Nota. Tomado de *Mechan, F., Bartonicek, Z., Malone, D. et al. Vehículos aéreos no tripulados para vigilancia y control de vectores de malaria y otras enfermedades transmitidas por vectores. Malar J 22 , 23 (2023)*

5.5 Inspecciones en alcantarillados

Un sistema de alcantarillado es un entorno altamente estructurado. Consiste en muy pocos tipos de objetos, a saber, tuberías y pozos de acceso. Las alcantarillas difieren en el número de tuberías que dejan entrar y salir el agua y en la geometría. La característica más importante son las diferentes alturas de las tuberías, lo que da como resultado escalones que el robot tiene que subir.

Figura 6. Imágenes del interior del alcantarillado



Nota. Tomado de *Alejandro Pinilla , Antonio Lastr , Jaime Botello , Mónica Ortega , Celia Ortega, La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección. 2023.*

En varias partes del mundo, las mediciones del sistema de alcantarillado se almacenan en bases de datos especiales (sistemas de información de alcantarillado). (Adria O, Streich H y Hertzberg J.2020)

La inspección adecuada de las alcantarillas pequeñas puede evitar fallas en las carreteras, perturbaciones del tráfico y ahorrar recursos en costosas reparaciones. La falla de estas alcantarillas podría provocar inundaciones, perturbaciones del tránsito o daños a la calzada. La inspección puede proporcionar una advertencia temprana de signos de deterioro, como grietas, separaciones y orificios, antes de que se produzcan fallas mayores. Las alcantarillas dañadas a menudo se pueden reparar de forma rápida y rentable, con un bajo impacto en el tráfico, si el problema se detecta a tiempo. Un técnico capacitado puede caminar e inspeccionar visualmente grandes alcantarillas con diámetros superiores a 1,22 m (48 pulg.). Sin embargo, las alcantarillas más pequeñas que no se pueden inspeccionar visualmente requieren un método alternativo de inspección. Un enfoque es controlar de forma remota un pequeño vehículo robótico a través de una alcantarilla. Luego, un técnico puede usar secuencias de video transmitidas desde el vehículo para realizar la inspección de la alcantarilla. (Burton, et al, 2021)

5.6 Selección de tipos de drones en inspección de alcantarillados

En la inspección de alcantarillados, la selección del tipo de dron adecuado depende principalmente del tamaño y las características del ducto a inspeccionar. Los tipos de drones que suelen utilizarse según el tamaño de los ductos son:

5.6.1 Drones Pequeños y Ágiles:

- **Características:**
 - Tamaño compacto y diseño robusto para maniobrar en espacios estrechos.
 - Capacidad para volar en ambientes confinados y de difícil acceso.
- **Uso:**

- Ideal para inspeccionar alcantarillados pequeños y tuberías estrechas donde el acceso físico es limitado.
- Equipados con cámaras de alta resolución para capturar imágenes detalladas.

5.6.2 Drones con Cámaras de Alta Resolución:

- **Características:**

- Equipados con cámaras de alta resolución para capturar imágenes nítidas y detalladas.
- Pueden incluir sensores adicionales como infrarrojos para detectar problemas ocultos.

- **Uso:**

- Adecuados para inspeccionar tuberías de tamaño mediano a grande con accesos más amplios.
- Permiten identificar obstrucciones, grietas, corrosión y otros daños estructurales.

5.6.3 Drones con Sensores LIDAR:

- **Características:**

- Utilizan tecnología LIDAR para escanear entornos en 3D con alta precisión.
- Capaces de generar modelos tridimensionales detallados de tuberías y estructuras subterráneas.

- **Uso:**

- Indicados para inspecciones de grandes ductos y redes extensas.

- Proporcionan datos precisos sobre la topografía y la condición estructural de la infraestructura.

5.6.4 Drones Multirotor y de Ala Fija:

- **Características:**

- Multirotor: Versátiles y estables para operaciones cercanas al suelo.
- Ala fija: Eficientes para cubrir grandes áreas rápidamente.

- **Uso:**

- Los multirrotores son ideales para maniobras precisas en espacios reducidos.
- Los de ala fija son eficaces para inspecciones de largo alcance y grandes extensiones de alcantarillado.

La elección del dron adecuado depende del entorno específico del alcantarillado, incluyendo el tamaño de los ductos, la accesibilidad, y los objetivos de la inspección. Es crucial seleccionar un dron que cumpla con los requisitos técnicos para capturar datos precisos y facilitar el análisis detallado de la infraestructura subterránea.

5.7 Avance de inspecciones de alcantarillados en Colombia

En el contexto colombiano, donde muchas ciudades enfrentan desafíos en la gestión de infraestructuras urbanas, incluidos los sistemas de alcantarillado, el uso de drones en la recolección de información primaria ha generado grandes beneficios:

- **Gestión Eficiente de Recursos:** Permite optimizar el uso de recursos al identificar áreas prioritarias para mantenimiento y reparación.
- **Cumplimiento Normativo:** Ayuda a cumplir con regulaciones ambientales al detectar fugas o contaminación en los sistemas de alcantarillado.

- Planificación Urbana: Proporciona datos precisos para la planificación y desarrollo urbano sostenible, asegurando que los sistemas de alcantarillado puedan soportar el crecimiento urbano y las demandas futuras.

5.7.1 Ventajas de los Drones en la Inspección de Alcantarillado

- Acceso a Áreas Difíciles: Los drones pueden acceder a partes de los sistemas de alcantarillado que son difíciles o peligrosas para los trabajadores humanos. Esto incluye tuberías subterráneas estrechas, túneles de difícil acceso, y áreas con riesgo de colapso.
- Inspección Visual Detallada: Equipados con cámaras de alta resolución y sistemas de iluminación adecuados, los drones pueden capturar imágenes detalladas del interior de las tuberías y conductos. Esto permite detectar grietas, corrosión, obstrucciones y otros problemas estructurales sin necesidad de intervenciones físicas directas.

Figura 7. Imagen del dron volando en el colector del laminador de la Gavia



Nota. Tomado de *Alejandro Pinilla , Antonio Lastr , Jaime Botello , Mónica Ortega , Celia Ortega, La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección. 2023.*

- **Monitoreo Continuo y Preventivo:** Los drones pueden realizar inspecciones de manera regular y programada, proporcionando datos actualizados sobre el estado de los sistemas de alcantarillado. Esto facilita la detección temprana de problemas y permite la implementación de mantenimiento preventivo.
- **Rapidez y Eficiencia:** Comparado con otros métodos de inspección, el uso de drones es considerablemente más rápido y eficiente. Esto reduce el tiempo de inactividad de los sistemas y minimiza los costos asociados con la inspección y mantenimiento.

6. Etapas para la obtención de un producto cartográfico

La obtención de datos en aplicaciones cartográficas con drones es un proceso fundamental que involucra varias etapas y tecnologías específicas.

6.1 Planificación de la Misión

Durante la fase de planificación del vuelo, es necesario conocer los aspectos legales que rigen el vuelo, y verificar si la zona de estudio se encuentra dentro de un área urbana o rural y si se encuentra afectada por alguna restricción de la autoridad de aviación civil.

En cuanto a los aspectos técnicos, se debe establecer de manera correcta la ubicación y puntos de control en tierra, tiempo de vuelo, la velocidad máxima del sensor y la orientación y posición de las fotografías a capturar, y se debe cargar en la aplicación el vuelo programado.

Para ser utilizado. Es importante tener en cuenta la altura solar y la constelación de satélites GNSS, y revisar cualquier fenómeno meteorológico que impacte directamente en el vuelo.

También hay algunas recomendaciones generales, como determinar la topografía del área utilizando un modelo de elevación, en el caso de terrenos escarpados, ya que esto produce una mejor cobertura de la imagen. Para este tipo de terreno, o cuando existen oclusiones, se recomienda realizar fotografías oblicuas para mejorar el proceso de orientación y obtener tomas más ortogonales del sujeto (Arévalo-Verjel, et al, 2022)

6.1.1 Selección del Equipo y Sensores

Se elige el dron adecuado en función del alcance, duración del vuelo, carga útil. Los sensores pueden incluir cámaras RGB de alta resolución, cámaras multiespectrales para análisis vegetal, cámaras térmicas, y sistemas LIDAR para mediciones precisas de elevación.

6.1.2 Definición del Área de Vuelo y Ruta

Se delimita el área de interés en el mapa y se planifica la ruta de vuelo del dron para cubrir eficientemente toda el área. Esto se realiza mediante software de planificación de vuelos que tiene en cuenta la altitud, la superposición de las imágenes y las restricciones de espacio aéreo.

La planificación de vuelo para drones se puede realizar utilizando herramientas como Mission Planner y Pix4Dcapture. Ambas aplicaciones permiten a los operadores planificar, monitorear y ejecutar vuelos automatizados, facilitando la recolección de datos y optimizando las misiones.

Mission Planner: es una herramienta de planificación de vuelos de código abierto utilizada principalmente con drones que operan con el firmware ArduPilot.

❖ Características:

Planificación de Misión:

- Crear rutas de vuelo mediante waypoints.
- Establecer altitudes, velocidades y acciones específicas en cada waypoint

(e.g., tomar una foto, activar un servo).

Monitoreo en Tiempo Real:

- Ver la ubicación del dron en tiempo real en un mapa.
- Supervisar telemetría en vivo, como altitud, velocidad, y estado de la

batería.

Control Manual:

Posibilidad de tomar el control manual del dron si es necesario.

Configuración del Dron:

- Configurar y calibrar sensores, como el GPS, acelerómetros, y giroscopios.
- Ajustar parámetros de vuelo para optimizar el rendimiento del dron.

Análisis de Datos:

Descargar y analizar los registros de vuelo para diagnosticar problemas y mejorar futuras misiones.

❖ Uso:

Instalación:

Descargar e instalar Mission Planner desde su sitio web oficial.

Conexión:

Conectar el dron al ordenador mediante un cable USB o un enlace de telemetría.

Planificación:

- En la pestaña "Flight Plan", añadir waypoints al mapa.
- Configurar las acciones deseadas en cada waypoint.

Ejecución:

- ☐ Subir la misión al dron y comenzar el vuelo.
- ☐ Monitorear el vuelo en tiempo real y realizar ajustes si es necesario.

Pix4Dcapture: es una aplicación móvil diseñada para la captura de imágenes aéreas, principalmente para proyectos de fotogrametría y mapeo. Es compatible con una variedad de drones y se integra con el software Pix4D para el procesamiento de imágenes.

❖ **Características:**

Planificación de Misiones de Mapeo:

- Crear misiones de vuelo automatizadas para capturar imágenes georreferenciadas.

- Configurar la superposición de imágenes, altitud de vuelo y área de cobertura.

Modos de Captura:

Diferentes modos de captura, como grilla (grid), círculo, y doble grilla (double grid), dependiendo de las necesidades del proyecto.

Compatibilidad:

Compatible con drones de diferentes fabricantes, incluyendo DJI, Parrot, y Yuneec.

Monitoreo y Control:

- Supervisar el progreso de la misión en tiempo real desde un dispositivo móvil.
- Pausar, reanudar o abortar la misión si es necesario.

Uso:**Instalación:**

Descargar e instalar Pix4Dcapture en su dispositivo

Configuración:

- Conectar el dispositivo móvil al control remoto del dron.
- Seleccionar el tipo de dron y la cámara en la aplicación.

Planificación:

- En la aplicación, definir el área de interés y configurar parámetros de vuelo.
- Ajustar la altitud y la superposición de las imágenes para asegurar una cobertura adecuada.

Ejecución:

- Iniciar la misión de vuelo desde la aplicación.
- Monitorear el vuelo y la captura de imágenes en tiempo real.

6.2 Recuperación de datos

Después del vuelo, descarga y verifica las imágenes capturadas.

6.2.1 Descarga de Imágenes:

- Conecta la tarjeta de memoria del dron a tu computadora.
- Copia todas las imágenes capturadas a una carpeta en tu computadora.

6.2.2 Verificación y Organización:

- Revisa las imágenes para asegurarte de que no haya fallos o áreas sin cubrir.
- Organiza las imágenes en carpetas según su ubicación o secuencia de captura.

6.3 Procesamiento y análisis

Utiliza software especializado para procesar y analizar las imágenes capturadas.

Para procesar datos se puede utilizar el software Agisoft Metashape y Recap Photo de Autodesk, los cuales mencionare detalladamente los pasos a seguir para lograr un resultado exitoso, mostrando el como resultado final, la ortofoto de un ejemplo de la planificación de vuelo que se realizó en la universidad de pamplona con datos de la cámara phantom 4 pro mediante el software de Agisoft Metashape.

6.3.1 *Procesamiento de Datos con Recap Photo de Autodesk*

Recap Photo de Autodesk es una herramienta poderosa para la fotogrametría, especialmente útil para integrarse con otros productos de Autodesk.

Paso 1: Importación de Imágenes

1. **Abrir Recap Photo.**
2. **Crear un Nuevo Proyecto:**
 - Selecciona Nuevo Proyecto.
3. **Importar Imágenes:**
 - Sube todas las imágenes capturadas durante el vuelo.

Paso 2: Configuración de Proyecto

Configurar Proyecto:

- Establece los parámetros del proyecto, incluyendo el tipo de proyecto y la resolución deseada.

- Configura los parámetros de superposición y el área de interés si es necesario.

Paso 3: Procesamiento en la Nube

Iniciar Procesamiento:

- Sube las imágenes y envíalas para su procesamiento en la nube.
- Recap Photo procesará las imágenes y generará un modelo 3D, ortomosaico, y otros productos derivados.

Paso 4: Revisión de Resultados

Revisar y Ajustar:

- Una vez completado el procesamiento, revisa los resultados en Recap Photo.
- Realiza cualquier ajuste necesario utilizando las herramientas de edición disponibles.

Paso 5: Exportación de Resultados

Exportar Modelos 3D y Ortomosaicos:

- Exporta los resultados en el formato deseado (e.g., .rcp, .obj, .fbx).
- Integra los resultados con otros productos de Autodesk como AutoCAD, Revit, o Civil 3D para un análisis más detallado.

6.3.2 *Procesamiento de Datos con Agisoft Metashape*

Agisoft Metashape es un software popular para la fotogrametría y el procesamiento de imágenes aéreas, que permite crear modelos 3D, ortomosaicos y otros productos derivados.

Antes de empezar con cada uno de los pasos se activa el GPU para que el software no presente problemas con la velocidad.

Paso 1: Importación de Imágenes

1. **Abrir Agisoft Metashape.**
2. **Crear un Nuevo Proyecto:**

Ve a Archivo > Nuevo.

3. **Importar Imágenes:**
 - Ve a Workflow > Add Photos.
 - Selecciona todas las imágenes capturadas durante el vuelo y ábre las.

Paso 2: Alineación de Fotos

Alinear Fotos:

- Ve a Workflow > Align Photos.
- Configura los parámetros según tus necesidades (calidad de alineación y precisión).
- Inicia el proceso de alineación

Figura 8. Localización de los PA y PC



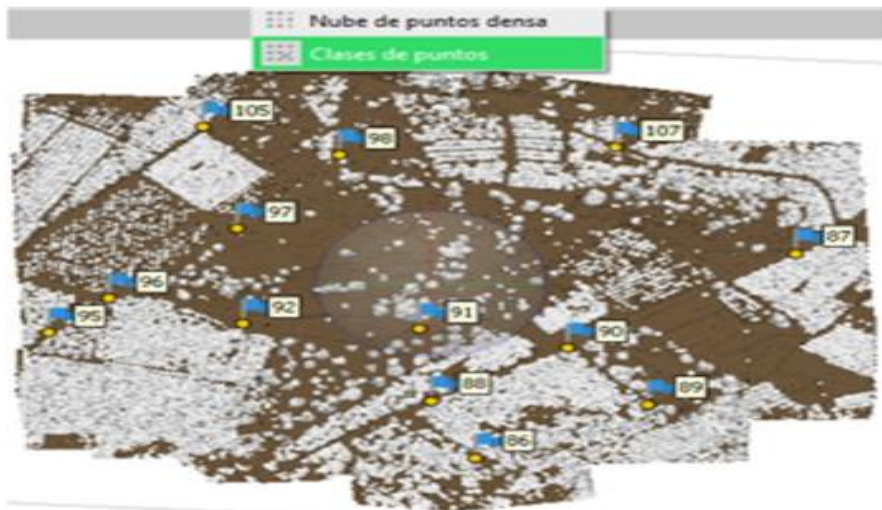
Nota. Tomado de Alba N. Arévalo-Verjel, José Luis Lerma, José Fernández, *COMPARATIVE SOFTWARE ANALYSIS TO OBTAIN DTM WITH RPAS PHOTOGRAMMETRY*. Tercer Congreso en Ingeniería Geomática Valencia, 7 – 8 de Julio de 2021.

Paso 3: Construcción de Nube de Puntos Densa

Generar Nube de Puntos Densa:

- Ve a Workflow > Build Dense Cloud.
- Selecciona la calidad deseada (normalmente High o Ultra High).
- Inicia el proceso de generación de la nube de puntos densa.

Figura 9. Clasificación de puntos software Agisoft Metashape



Nota. Tomado de Alba N. Arévalo-Verjel, José Luis Lerma, José Fernández, *COMPARATIVE SOFTWARE ANALYSIS TO OBTAIN DTM WITH RPAS PHOTOGRAMMETRY*. Tercer Congreso en Ingeniería Geomática Valencia, 7 – 8 de Julio de 2021.

Paso 4: Construcción de Malla

Crear una Malla:

- Ve a Workflow > Build Mesh.
- Selecciona la opción para crear la malla desde la nube de puntos densa.
- Configura los parámetros y ejecuta el proceso.

Paso 5: Generación de Textura

Aplicar Textura:

- Ve a Workflow > Build Texture.

- Configura los parámetros de textura y aplica la textura a la malla.

Paso 6: Exportación de Resultados

1. Exportar Modelos 3D:

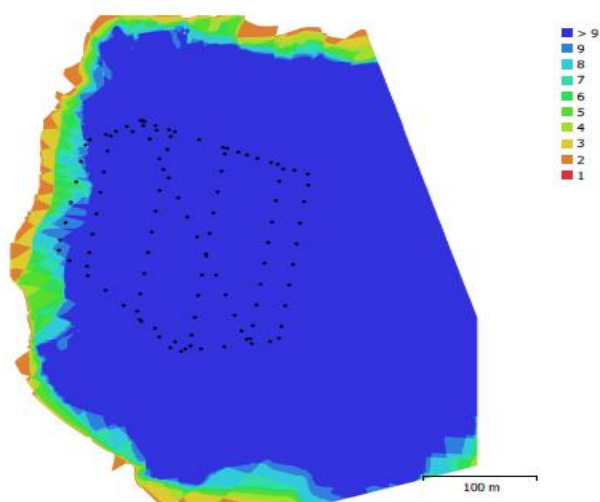
- Ve a Archivo > Export > Export Model.
- Selecciona el formato deseado (e.g., .obj, .fbx).

2. Exportar Ortomosaico:

- Ve a Archivo > Export > Export Orthomosaic.
- Configura los parámetros de exportación y guarda el ortomosaico.

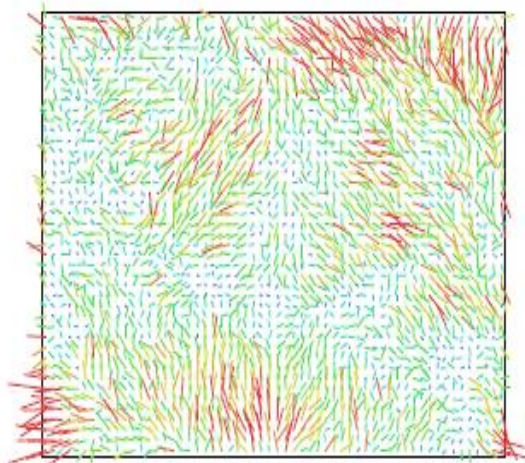
6.3.3 Resultados de imágenes efectuadas en el informe de procesamiento en Agisoft Metashape de ejemplo de vuelo realizado en la universidad de pamplona.

Figura 10. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes



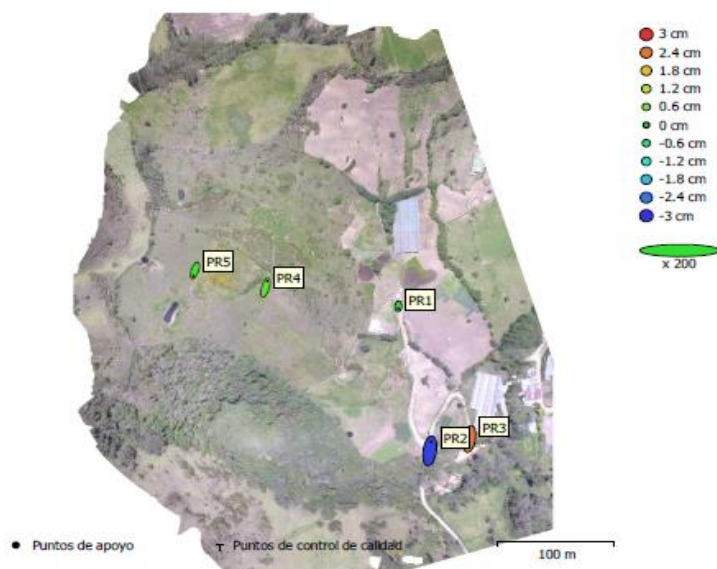
Nota. Datos de levantamiento. Software Agisoft Metashape, 2023

Figura 11. Gráfico de residuales para FC300S(3.61)mm



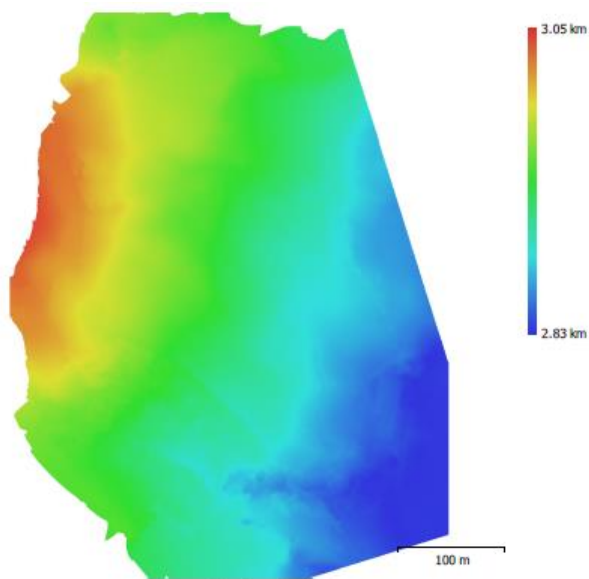
Nota. Calibración de la cámara. Software Agisoft Metashape, 2023

Figura 12. Posiciones de puntos de apoyo y estimación de errores



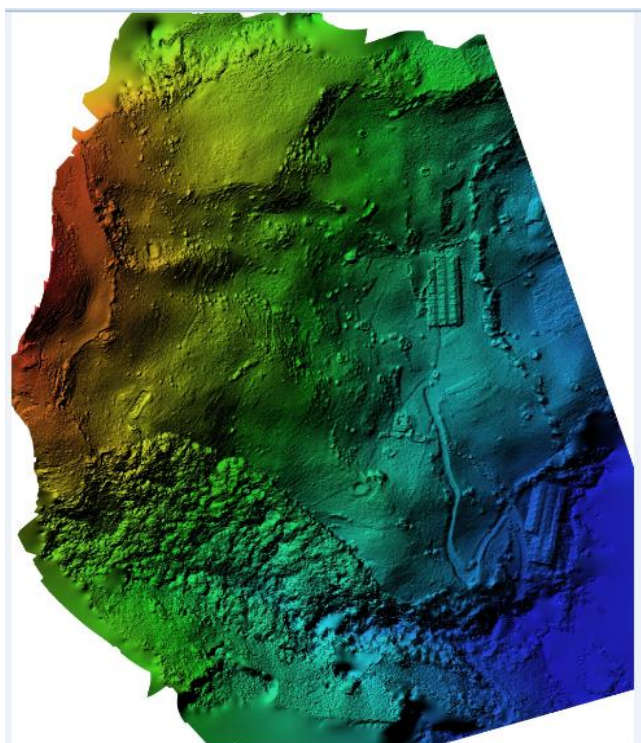
Nota. Puntos de control terrestre. El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY. Software Agisoft Metashape 2023

Figura 13.Modelo digital de elevaciones



Nota. Software Agisoft Metashape 2023

Figura 14. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)



Nota. Software Agisoft Metashape 2023

Figura 15.ORTOFOTO



Nota. Software Agisoft Metashape 2023

7. Ejemplos de aplicaciones

7.1 Ejemplo a nivel Nacional

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) decidió implementar una prueba piloto para inspeccionar las redes de alcantarillado utilizando drones, con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la seguridad de las inspecciones. Este proyecto se llevó a cabo en el barrio Chapinero, una zona con una red de alcantarillado compleja y de difícil acceso.

7.1.1 Metodología

1. Preparación y Planificación:

- Se identificaron las áreas críticas y de difícil acceso en la red de alcantarillado de Chapinero.
- Se diseñó un plan de vuelo utilizando software como Mission Planner y Pix4D Capture para garantizar la cobertura completa de las áreas seleccionadas.
- Se obtuvo la autorización correspondiente de la Aeronáutica Civil de Colombia, cumpliendo con la normativa establecida en la Resolución número 01983 del 27 de septiembre de 2023.

2. Ejecución del Vuelo:

- Se utilizaron drones equipados con cámaras de alta resolución y sensores LIDAR para capturar imágenes y datos precisos del interior de las tuberías de alcantarillado.
- Los vuelos se realizaron en horarios de bajo flujo de agua para minimizar interferencias y asegurar la calidad de los datos recolectados.

3. **Procesamiento de Datos:**

- Las imágenes y datos recolectados fueron procesados utilizando Agisoft Metashape y Autodesk ReCap Photo para generar ortomosaicos y modelos 3D detallados de la red de alcantarillado.
- Se aplicaron técnicas de análisis geoespacial para identificar áreas de obstrucción, desgaste y posibles daños estructurales.

7.1.2 *Resultados*

1. **Identificación de Problemas:**

- Se identificaron varias obstrucciones significativas causadas por acumulación de sedimentos y residuos sólidos en las tuberías.
- Se detectaron daños estructurales en varias secciones de las tuberías, incluyendo fisuras y desplazamientos.

2. **Eficiencia y Costos:**

- El uso de drones permitió completar la inspección en un tiempo significativamente menor comparado con los métodos tradicionales, reduciendo el tiempo de inspección de semanas a días.
- Se estimó una reducción del 30% en los costos operativos debido a la menor necesidad de equipos pesados y personal en campo.

3. **Seguridad:**

- Al no requerir que el personal ingresara físicamente a las tuberías, se eliminaron los riesgos asociados con la exposición a ambientes peligrosos, mejorando la seguridad del equipo de inspección.

4. Precisión y Calidad de Datos:

- Los modelos 3D y ortomosaicos generados proporcionaron una visualización detallada y precisa del estado de la infraestructura, facilitando la planificación de acciones correctivas y de mantenimiento.

7.1.3 Conclusiones

La implementación de drones en la inspección de alcantarillado en Chapinero demostró ser una solución efectiva y eficiente. Los resultados obtenidos evidenciaron mejoras significativas en la identificación y diagnóstico de problemas, reducción de costos y tiempos operativos, y un incremento notable en la seguridad del personal. Estos hallazgos sugieren que la adopción de esta tecnología puede ser beneficiosa para otras áreas de Bogotá y potencialmente para otras ciudades en Colombia.

El éxito de este proyecto piloto ha llevado a la EAAB a considerar la expansión del uso de drones para la inspección de toda la red de alcantarillado de la ciudad, con el objetivo de mantener y mejorar la infraestructura de manera más proactiva y eficiente.

7.2 Ejemplo a nivel internacional

El Canal de Isabel II es una empresa pública en la Comunidad de Madrid, España, responsable de la gestión del ciclo integral del agua. Fue fundada en 1851 durante el reinado de Isabel II, de ahí su nombre, y tiene como función principal asegurar el abastecimiento de agua potable a la

ciudad de Madrid y su área metropolitana. Además del suministro de agua, el Canal de Isabel II se encarga del tratamiento de aguas residuales, la gestión de infraestructuras hidráulicas, y la protección y conservación de recursos hídricos en la región. Es una entidad clave en la gestión sostenible del agua y el mantenimiento de la calidad del servicio en la comunidad madrileña.

Durante el año 2016, desde la Subdirección de I+D+i de Canal de Isabel II S.A., M.P., como empresa responsable de la gestión del ciclo urbano del agua en la Comunidad de Madrid y con más de 15000 km de colectores y emisarios de los cuales 2400 km de colectores son de gran diámetro en la red de alcantarillado (Lastra et al., 2019), se ideó la posibilidad de llevar a cabo un proyecto que fuese capaz de desarrollar un equipo autónomo para facilitar la inspección de la red de visitables de alcantarillado, teniendo en cuenta el potencial de aplicación, el posterior avance de la tecnología y la importancia de la transformación digital, se consideraba un estudio ambicioso (Pinilla, et al, 2015)

Teniendo en cuenta el particular ámbito de aplicación para este equipo a desarrollar, ya que se trata de un espacio confinado, sin ningún tipo de comunicación en su interior, con posibilidad de acumulación de gases y condensación agua, además de lo ya comentado anteriormente de lo irregular de estas infraestructuras, el equipo debería disponer de unas características funcionales específicas para dicho ámbito. De las cuales se consideraban destacadas a disponer por el equipo, las siguientes características funcionales:

- Robustez y estabilidad de vuelo para llevar a cabo inspecciones en espacios confinados, teniendo en cuenta posibles turbulencias que se pudieran generar en el interior.

- Un tamaño y un peso adecuado para poder introducirse a la red de alcantarillado por los pozos de entrada de personas con aproximadamente 60 cm de diámetro y poder desplazarse cómodamente.
- Capacidad de autoguiado del equipo, para poder llevar a cabo toma de decisiones y sortear posibles obstáculos en el interior de la infraestructura.
- Obtención de datos de gran calidad para disponer de un modelo 3D texturizado.
- Autonomía suficiente para llevar a cabo una inspección óptima
- Sistema de iluminación
- Sistema de medición de fisuras y acometidas
- Sistemas de seguridad y protocolo en caso de fallo.

Posteriormente, durante los años 2017 y 2018, fue realizado un sondeo del estado del arte y del mercado para ver si se disponía de dicha tecnología probada y validada en un entorno real y concluido que no existía ningún equipo de similares características a las del objeto del proyecto, fue llevado a cabo una licitación por parte de Canal de Isabel II S.A., M.P., de un procedimiento innovador de CPP para poder desarrollar en equipo autónomo para inspeccionar las galerías y colectores visitables de la red de alcantarillado (Pinilla, et al, 2015)

7.2.1 Material y métodos

A mediados del año 2019 se inició desde la Subdirección de I+D+i de Canal de Isabel II un proyecto a partir de un procedimiento de contratación innovador de Compra Pública Pre-

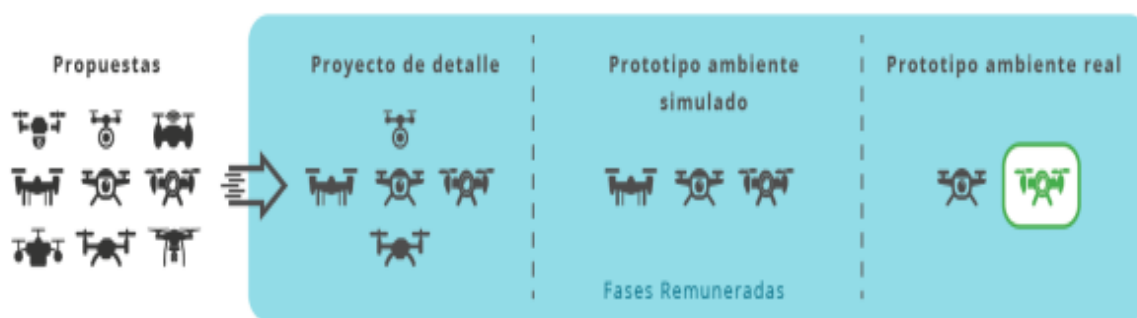
comercial (CPP), este procedimiento de contratación ha sido ejecutado en varias fases lo cual ha permitido desarrollar un dron autónomo ad hoc para la inspección de galerías y colectores visitables de la red de alcantarillado.

El procedimiento de Compra Pública Pre-comercial está compuesto por 3 fases y una fase previa:

- Fase 0 o fase previa al procedimiento de CPP, corresponde a una fase de admisión de propuestas de desarrollo de un dron de diferentes empresas de innovación, en el cual se presentaron más de 20 propuestas diferentes, de las que fueron seleccionadas 5 que pasaron a la siguiente fase de desarrollo.
- Fase 1 o fase inicial del procedimiento de CPP, se trata de una fase en la que las 5 propuestas anteriores entregan un proyecto de detalle del desarrollo del equipo autónomo, un equipo multidisciplinar de Canal de Isabel II S.A., M.P., valora a partir de una matriz de características básicas u obligatorias y funcionales que tiene que disponer el equipo para el objeto del contrato. Los 3 proyectos de detalle mejor valorados pasaron a la siguiente fase de desarrollo.
- Fase 2 del procedimiento de CPP, en esta fase las empresas con los 3 proyectos de detalle con mejor valoración desarrollaron un prototipo funcional para ser probado y validado en un entorno de ambiente simulado, en este caso se llevaron a cabo las pruebas en una infraestructura de Canal de Isabel II S.A., M.P., en seco, sin agua residual. En este caso los dos prototipos mejor desarrollados fueron los que accedieron a la fase definitiva de desarrollo del equipo autónomo.
- Fase 3 o fase definitiva del procedimiento de CPP, en esta fase las empresas con los dos prototipos funcionales mejor valorados desarrollaron dos prototipos definitivos para ser probados y validados en un entorno real. En este caso se realizaron 8 pruebas en diferentes colectores

visitables de Canal con un total de más de 4000 m de red recorridos, lo cual permitió estresar lo suficiente como para poder valorar, validar y comprobar en un entorno real que se había desarrollado un equipo autónomo capaz de inspeccionar las galerías y colectores visitables el solo (Pinilla, et al, 2015)

Figura 16. Fases del procedimiento de compra pública Pre-comercial



Nota. Tomado de Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección.

Finalmente, el equipo que se ha desarrollado para este ámbito de aplicación es un equipo con unas características físicas y funcionales muy acordes a lo que se había establecido previamente como objeto del procedimiento de contratación con un tamaño y peso adecuados, una estabilidad de vuelo probada y validada en galerías y colectores visitables, con gran capacidad de auto guiado y registro de datos de alta calidad, etc.(Pinilla, et al, 2015)

Figura 17. Imagen del prototipo definitivo utilizado en la fase 3 y adjudicatario de la CPP



Nota. Tomado de Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección.

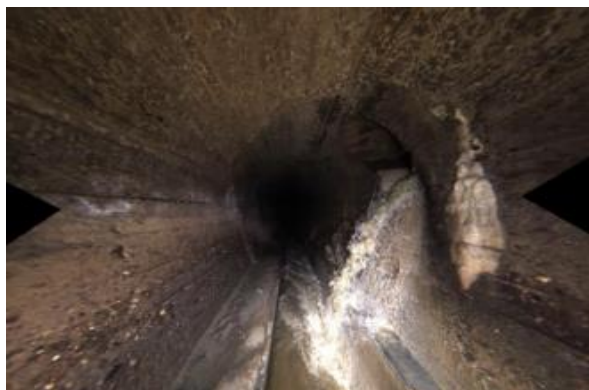
7.2.2 Resultados

Durante el segundo semestre del 2021 y el primer semestre del 2022 fueron llevadas a cabo las 8 pruebas para conseguir el dron definitivo en diferentes colectores de la red de alcantarillado de la Comunidad de Madrid, lo que ha permitido ir desarrollando el equipo autónomo óptimo y, además, se han conseguido diferentes retos, entre los que se pueden destacar:

- Alta estabilidad de vuelo del dron realizando las inspecciones de la red de alcantarillado, absorbiendo todo tipo vibraciones y turbulencias generadas dentro del espacio confinado.
- Capacidad de autoguiado y toma de decisiones demostrada, llevando a cabo inspecciones de las infraestructuras lineales, desde 200 m hasta 1000 m de forma continua, en las cuales ha sorteado obstáculos tales como, cambios de sección de la infraestructura, acometidas con vertido a diferentes alturas, bifurcaciones o entronques de gran tamaño, modificaciones de pendiente en los tramos inspeccionados y otro tipo de irregularidades

que se ha visionado en la inspección en gabinete, telas de araña, plásticos, fibras, conductos y cableado de otros servicios.

Figura 18. Imagen del dron sorteando una acometida con vertido en el lateral superior de la galería



Nota. Tomado de Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección.

- Autonomía suficiente para este tipo de inspecciones, llegando a conseguir una autonomía de 27 minutos que a una velocidad aproximada del equipo de 1 m/s, permite recorrer tramos seguidos de hasta 1600 m.
- Iluminación óptima que ha permitido poder capturar imágenes de alta calidad para poder realizar una inspección posteriormente en gabinete.
- Han sido probado y validados diferentes protocolos de seguridad y fallo que ha permitido que el dron vuelva a su posición inicial.
- Se ha validado la posibilidad de medición de acometidas y fisuras con precisión de milímetros, lo cual es de una importancia vital para la mejora en el mantenimiento integral del alcantarillado.

Figura 19. Imagen de medición de una acometida del colector inspeccionado



Nota. Tomado de Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección.

- El dron es capaz de inspeccionar colectores de 1.2 m de diámetro mínimo como se establecía en el procedimiento de contratación, pero incluso se ha llegado a inspeccionar algún tramo de galería de 1.1 m ancho.
- Han sido realizadas inspecciones de tramos de red de más de 3000 m por subtramos, en poco más de una hora, cambiando baterías y descargando los datos obtenidos de cada subtramo.
- Un sistema de captura de datos de alta calidad específico y de desarrollo propio para este ámbito de aplicación a través del cual se obtiene una recopilación de nube de puntos en 3D e imágenes de alta calidad y de esta manera poder disponer de un modelo 3D texturizado o gemelo digital de la infraestructura inspeccionada en la que se tiene el control geométrico de la misma, pudiendo llegar a medir una fisura con una resolución superior de 1 mm/píxel en galerías de hasta dos metros de diámetro (Pinilla, et al, 2015)

Figura 20. Imagen de la modelización 3D georreferenciada de un tramo del colector Abroñigal derecho



Nota. Tomado de Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección

Conclusiones

El uso de drones en Colombia está transformando múltiples sectores, ofreciendo soluciones innovadoras y eficientes para diversas necesidades. La adopción de esta tecnología continúa creciendo, impulsada por los avances en la capacidad y accesibilidad de los drones, así como por las ventajas que proporcionan en términos de costo, seguridad y precisión. A medida que se desarrollan nuevas aplicaciones y se optimizan las existentes, los drones seguirán desempeñando un papel crucial en el desarrollo y la modernización del país.

Estas aeronaves han demostrado ser útil y eficientes en diversas operaciones. En el campo de agricultura, la construcción y la inspección de infraestructuras, los drones permiten realizar tareas de manera más rápida y precisa en comparación con los métodos tradicionales, reduciendo tiempos y optimizando recursos.

La ciencia de los drones permite un monitoreo continuo y un mantenimiento proactivo de las infraestructuras de alcantarillado. Las inspecciones regulares y detalladas pueden identificar problemas emergentes antes de que se conviertan en fallos críticos, permitiendo reparaciones oportunas y evitando interrupciones costosas en el servicio.

La utilización de drones reduce la huella ecológica de las inspecciones de alcantarillados. Al minimizar la necesidad de equipos pesados y desplazamientos frecuentes, se disminuye el consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

Se resalta la importancia del uso de aeronaves en la población mundial ya que ofrece múltiples ventajas que abarcan desde la mejora de la eficiencia y la seguridad hasta la reducción de costos

y el impacto positivo para con el medio ambiente. Estos beneficios, junto con el continuo desarrollo tecnológico, aseguran un futuro prometedor para los drones, consolidándolos como una herramienta esencial en diversas industrias y aplicaciones.

Bibliografía

- Adria O, Streich H, Hertzberg J. Replanificación dinámica en entornos inciertos para un robot de inspección de alcantarillado. *Revista Internacional de Sistemas Robóticos Avanzados* . 2004;1(1). doi: 10.5772/5617
- Ajay Vishwath N.C., Arvind R Yadav, Deep Mehta, Jatin Belani, Ravi Raj Chauhan, A guide to novice for proper selection of the components of drone for specific applications, *Materials Today: Proceedings*, Volume 65, Part 8, 2022, Pages 3617-3622, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.187>.
- Alba N. Arévalo-Verjel, José Luis Lerma, José Fernández, COMPARATIVE SOFTWARE ANALYSIS TO OBTAIN DTM WITH RPAS PHOTOGRAMMETRY. Tercer Congreso en Ingeniería Geomática Valencia, 7 – 8 de Julio de 2021.
- Arévalo-Verjel, AN; Lerma, JL; Prieto, JF; Carbonell-Rivera, JP; Fernández, J. Estimación del error de ajuste de bloques en vuelos fotogramétricos de UAV en áreas planas. *Sensores remotos* 2022,14, 2877. <https://doi.org/10.3390/rs14122877>
- Asif Ali Laghari, Awais Khan Jumani, Rashid Ali Laghari, Haque Nawaz, Unmanned aerial vehicles: A review, *Cognitive Robotics*, Volume 3, 2023, Pages 8-22, ISSN 2667-2413, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241322000258>)
- Basaran Bahadir Kocer, Tegoeh Tjahjowidodo, Mahardhika Pratama, Gerald Gim Lee Seet, Inspection-while-flying: An autonomous contact-based nondestructive test using UAV-tools, *Automation in Construction*, Volume 106, 2019, 102895, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102895>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519301451>)
- Bundin, M., Martynov, A., Shireeva, E., Egorova, M. (2020). Marco Legal para el Uso de Drones por Entidades Públicas con Fines de Monitoreo y Control en Rusia. En: Chugunov, A., Khodachek, I., Misnikov, Y., Trutnev, D. (eds) *Gobernanza Electrónica y Sociedad Abierta: Desafíos en Eurasia. EGOSE 2020. Comunicaciones en Informática y Ciencias de la Información*, vol 1349. Springer, Cham. https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1007/978-3-030-67238-6_7
- Burton, J., Orfeo, DJ, Griswold, L., Stanley, SK, Redmond, M., Xia, T. y Houston, D. (2021). Vehículo de inspección de alcantarillas con rango de telemetría mejorado. *Registro de investigación de transporte* , 2675 (11), 946–954. <https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1177/03611981211021850>
- Calderón Aragón, G., Cubillos Rodríguez, J. P., & Delgado niño, P. Uso de los vehículos aéreos no tripulados (drones) para el levantamiento de información primaria en los estudios

ambientales por parte de las consultoras ambientales. *Avances Investigación En Ingeniería*, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7575>.

I. Colomina, P. Molina, Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 92, 2014, Pages 79-97, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>)

Janet Mayowa Nwaogu, Yang Yang, Albert P.C. Chan, Hung-lin Chi, Application of drones in the architecture, engineering, and construction (AEC) industry, *Automation in Construction*, Volume 150, 2023, 104827, ISSN 0926-5805, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523000870>

Karl Kullmann (2018) El ojo del dron: aplicaciones e implicaciones para la arquitectura del paisaje, *Landscape Research*, 43:7, 906-921, DOI: 10.1080/01426397.2017.1386777
<https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1080/01426397.2017.1386777>

Ma Yumeng., Mustapha, F., Ishak, M. R., Rahim, S. A., & Mustapha, M. (2022). Data-driven methods for damage detection and identification of UAV: A review. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 54(4), 405-420.
doi:10.6125/JoAAA.202212_54(4).04

Martina Mandirola, Chiara Casarotti, Simone Peloso, Igor Lanese, Emanuele Brunesi, Ilaria Senaldi, Federico Risi, Alessandro Monti, Carlo Facchetti, Guidelines for the use of Unmanned Aerial Systems for fast photogrammetry-oriented mapping in emergency response scenarios,

International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 58, 2021, 102207, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102207>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420921001734>)

Md Shah Alam, Jared Oluoch, A survey of safe landing zone detection techniques for autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs), *Expert Systems with Applications*, Volume 179, 2021, 115091, ISSN 0957-4174, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421005327>

Mechan, F., Bartonicek, Z., Malone, D. et al. Vehículos aéreos no tripulados para vigilancia y control de vectores de malaria y otras enfermedades transmitidas por vectores. *Malar J* 22 , 23 (2023). <https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1186/s12936-022-04414-0>

Mingyang Huang, Research on modelling accuracy and test validation for biomimetic flapping-wing drone, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, Volume 3, Issue 1, 2023, 100086, ISSN 2667-3797, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667379722000468>)

Mingzhu Wang, Srinath Shiv Kumar, Jack C.P. Cheng, Automated sewer pipe defect tracking in CCTV videos based on defect detection and metric learning, *Automation in Construction*,

Volume 121, 2021, 103438, ISSN 0926-5805,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580520310189>

Morgenthal G, Hallermann N. Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Visual Inspection of Structures. *Advances in Structural Engineering*. 2014;17(3):289-302. doi:10.1260/1369-4332.17.3.289

Mostafa M. Shibl, Loay S. Ismail, Ahmed M. Massoud, A machine learning-based battery management system for state-of-charge prediction and state-of-health estimation for unmanned aerial vehicles, *Journal of Energy Storage*, Volume 66, 2023, 107380, ISSN 2352-152X, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23007776>

Perez, M. A., Zech, W. C., & Donald, W. N. (2015). Using Unmanned Aerial Vehicles to Conduct Site Inspections of Erosion and Sediment Control Practices and Track Project Progression. *Transportation Research Record*, 2528(1), 38–48. <https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.3141/2528-05>

Pinilla, A., Lastra, A., Botello, J., Ortega, M., & Ortega, C. (2024). La inteligencia artificial aplicada al alcantarillado: El dron autónomo de inspección.

Reagan D, Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. *Structural Health Monitoring*. 2018;17(5):1056-1072. <https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1177/1475921717735326>

S. Leirens, J.M. Giraldo, R.R. Negenborn, B. De Schutter, A Pattern Search Method for Improving the Operation of Sewer Systems, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 43, Issue 8, 2010, Pages 591-596, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902661913, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015334558>

Sánchez-Zuluaga, G.J.; Isaza-Giraldo, L.; Zapata-Madrigal, G.D.; García-Sierra, R.; Candelobecerra, J.E. Unmanned Aircraft Systems: A Latin American Review and Analysis from the Colombian Context. *Appl. Sci*. 2023, 13, 1801. <https://doi.org/10.3390/app13031801>

Serafinelli, E. (2022). Imagining the social future of drones. *Convergence*, 28(5), 1376–1391. <https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1177/13548565211054904>

<https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1177/13548565211054904>

Verma M, Lafarga V, Baron M, Collette C. Active stabilization of unmanned aerial vehicle imaging platform. *Journal of Vibration and Control*. 2020;26(19-20):1791-1803. doi:10.1177/1077546320905494

<https://doi-org.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/10.1177/1077546320905494>

William Benigno Barragán Zaque, Hugo Alexander Rondón Quintana, and Wilmar Dario Fernandez "Automatic classification of point clouds obtained with different airborne sensors in UAV", *Proc. SPIE 11174, Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019)*, 1117415 (27 June 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2533739>