



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Colegio de Ingeniería Topográfica y Geodésica

**“FOTOGRAMETRIA MODERNA CON DRON:
APLICACION EN LA INGENIERIA TOPOGRÁFICA EN
BOCA DEL RÍO, VERACRUZ “**

TESIS

Que para obtener el grado de:

LICENCIATURA INGENIERO TOPÓGRAFO Y GEODESTA

PRESENTA:

GUALBERTO MONTIEL DIAZ

Asesor:

DR. ROGELIO RAMOS AGUILAR

Co asesor:

MTRA. PATRICIA MAXIMO ROMERO

Agradecimientos

En este punto de inflexión profesional como pasante de Ingeniero Topógrafo Geodesta, al buscar obtener mi grado, me sumerjo en un mar de gratitud y emoción. Este viaje ha sido una travesía de desafíos, pero también de crecimiento y logros que no habría alcanzado sin el apoyo incondicional de las personas y entidades especiales en mi vida.

Mi historia en esta maravillosa disciplina comenzó en la Facultad de Ingeniería de la BUAP, donde me adentré en el intrigante mundo de la topografía y la geodesia. En este viaje académico, tengo un profundo agradecimiento hacia mi alma mater por brindarme la mejor educación, así como las habilidades necesarias para mi formación como ingeniero topógrafo geodesta.

El proyecto de tesis es un hito en mi camino profesional, y aquí es donde debo el reconocimiento de este logro a mi distinguido comité de tesis, con especial mención a la Mtra. Patricia Máximo Romero y al Dr. Rogelio Ramos Aguilar, por su guía experta, dedicación y apoyo, que han sido la brújula que ha orientado mi rumbo a través de la investigación. Gracias a ellos, pude adquirir conocimientos y aprender la importancia de la perseverancia y la pasión en mi profesión.

En este viaje, mis compañeros y yo compartimos desafíos y triunfos que enriquecieron nuestra experiencia académica. Cada uno contribuyó a nuestro crecimiento y aprendizaje, y con gratitud reconozco su influencia en mi formación.

Mi camino profesional me ha brindado la oportunidad de aplicar mis conocimientos en proyectos de Ingeniería de gran envergadura. Estas experiencias me han permitido ver la aplicación práctica de la ciencia en el mundo real y ampliar mi horizonte de experiencia profesional.

Agradezco a las empresas que han depositado su confianza en mí y me han brindado la oportunidad de colaborar en sus proyectos, así como a mis colegas por sus aportaciones y enseñanzas.

Mis seres queridos, mi familia y amigos, merecen un reconocimiento especial; su apoyo emocional y anímico fueron pilares en momentos de incertidumbre y desafíos. Sin su cariño, amor y comprensión, este viaje habría sido más complicado.

En este camino hacia la verdad y la excelencia en la Topografía, debo reconocer y agradecer a Dios. Su influencia y enseñanzas han guiado mi camino y han sido una fuente de fortaleza y reflexión en mi viaje.

Este logro marca un punto de inflexión en mi vida y representa el esfuerzo conjunto de todas las personas e instituciones que creyeron en mí. A cada uno de ustedes, les agradezco infinitamente con el corazón.

Este título como Ingeniero Topógrafo Geodesta es un nuevo comienzo en mi carrera, una oportunidad de mejora continua en la ciencia y un compromiso para buscar y compartir conocimiento con el mundo y la sociedad.

Este es un punto de partida, y me emociona pensar en las oportunidades que se avecinan. Gracias a todos por ser parte de este logro en este viaje de superación.

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

A Dios, quien siempre me ha guiado, ha sido mi fortaleza y cuya mano de fidelidad y amor me ha acompañado en todos los momentos difíciles de mi camino.

A mis padres, María del Carmen y Cutberto, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me inculcaron valores y enseñanzas fundamentales para cumplir mis propósitos. Su valentía y determinación me han enseñado a no temer la adversidad y a reconocer la mano de Dios en nuestro propósito.

A mis hermanos, Jesús, Luz del Carmen y Dulce María, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en todo el proceso. Gracias por brindarme fuerzas y apoyo en los momentos difíciles.

A mis sobrinos, quienes son mi motivo de lucha y superación personal. Su amor y cariño me inspiran a ser una mejor persona y a esforzarme cada día.

A mi familia en general, por representar el más grande apoyo incondicional. Sus oraciones, consejos y palabras de aliento me dan la fuerza necesaria para sobresalir día a día.

A mis sinceros amigos, a quienes he conocido a lo largo del camino y quienes han aportado un gran valor a mi vida.

A aquellos que me han brindado su apoyo en situaciones y momentos difíciles, por su generosidad y amabilidad, les agradezco de corazón.

Y, por último, a aquellos que me han negado oportunidades, quienes no han sido buenas personas conmigo o han intentado limitar mi progreso. Les agradezco también por las lecciones aprendidas.

A Dios y al universo les expreso mi gratitud infinita

Índice

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	10
ANTECEDENTES.....	11
JUSTIFICACIÓN.....	13
OBJETIVOS GENERALES.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
ALCANCES	14
LIMITACIONES	14
METODOLOGÍA.....	15
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	16
1.1 TOPOGRAFÍA. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS BÁSICOS	16
1.2 PLANIMETRÍA Y ALTIMETRÍA	17
1.3 CLASIFICACIÓN DE LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS	18
1.4 FOTOGRAMETRÍA. CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS BÁSICOS	19
1.5 VENTAJAS DE LOS LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	20
1.6 FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE	20
1.7 FOTOGRAMETRÍA AÉREA	21
1.8 CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA.....	22
1.8.1 Fotogrametría analógica.....	22
1.8.2 Fotogrametría analítica.....	23
1.8.3 Fotogrametría digital.....	23
1.9 Breve desarrollo histórico de los drones.....	24
1.10 Segunda guerra mundial y desarrollo de los sistemas.....	29
1.11 Los años 50 y la guerra fría	30
1.12 Los años 60 y la guerra fría	31
1.13 Los años 70 y las misiones de reconocimiento	33
1.14 Los 80 y la expansión internacional de los RPAS.....	37
1.15 Los 90. El desarrollo de las grandes plataformas.....	39
1.16 La década de los 2000. Entrando al siglo XXI.....	41
1.17 Los avances de los sistemas en el año 2010.....	45
1.18 Tipos de UAVS.....	46
1.19 Componentes de un dron.....	49
1.20 USOS Y APLICACIONES EN LA INGENIERÍA.....	53
1.20.1 Aplicaciones cartográficas.....	53
1.20.2 Aplicaciones de los UAS en las vías terrestres.....	55
1.20.3 Aplicaciones de los UAS en catastro.....	56
1.20.4 Aplicaciones de los drones en la arqueología	57
1.20.5 Aplicaciones de los drones en la agricultura de precisión.....	58
1.20.6 Aplicaciones topográficas.....	60
1.21 NORMATIVA VIGENTE EN MÉXICO.....	62
1.22 PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PARA UAV	67
1.22.1 Metashape.....	67
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	68
2.1 MATERIALES Y EQUIPOS	68
2.1.1 Materiales.....	68
2.1.2 EQUIPOS	68
2.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	69
2.2.1 Técnica de recolección de datos.....	69
2.3 SALIDA A CAMPO - USO DE LA APLICACIÓN PIX4D MAPPER APP	70

2.3.1 Inicio de la misión.....	72
2.4 VUELO FOTOGRAFÉMICO.....	73
2.5 REPORTE DE VUELO.....	75
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.....	81
3.1 RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN BAJO LOS SIGUIENTES TÉRMINOS.....	81
3.2 GEORREFERENCIACIÓN	81
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS.....	89
ESPECIFICACIONES DE DRON PHANTOM 3 DJI.....	89
PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE PARA LEVANTAMIENTOS FOTOGRAFÉTRICOS CON DRON	90

Índice de Figuras

FIGURA 1. INFOGRAFÍA DE LA EVOLUCIÓN DE LOS DRONES.....	12
FIGURA 2. FOTOGRAFÍA TERRESTRE EN LA MEDICIÓN DE FOTOGRAFÍAS HORIZONTALES	20
FIGURA 3. EJEMPLOS DE CARTOGRAFÍA BASADA EN IMÁGENES AÉREAS	21
FIGURA 4. RESTITUIDOR ANALÓGICO.....	22
FIGURA 5. RESTITUIDOR ANALÍTICO.....	23
FIGURA 6.- RESTITUIDOR DIGITAL.....	24
FIGURA 7. EN 1898, SE PRESENTÓ A LA PRIMERA EXHIBICIÓN ELÉCTRICA UN BOTE MINIATURA CONTROLADO A DISTANCIA POR RADIO.....	25
FIGURA 8. EL TORPEDO AÉREO HEWITT-SPERRY SOBRE UNA CATAPULTA INSTALADA EN UNA VÍA FÉRREA	26
FIGURA 9. MODELO DEL HEWITT-SPERRY AUTOMATIC AIRPLANE	27
FIGURA 10. MODELO DEL LARNYX (LONG-RANGE GUN WITH LYNX ENGINE).	28
FIGURA 11. MODELO DEL QUEEN BEE.....	29
FIGURA 12. MODELO DEL V1 VEGETANCE WEAPON ALEMÁN.....	30
FIGURA 13. MODELOS DESARROLLADOS EN LOS 50. DEL LADO IZQUIERDO EL NORTHROP FALCONER O SHELDUCK Y EN LA DERECHA EL CROSSBOW DECOY	30
FIGURA 14. MODELO DEL RYAN FIREBEE	31
FIGURA 15. MODELO DEL NORTHROP CHUKAR	32
FIGURA 16. MODELO DEL UAS VTOL DASH.....	33
FIGURA 17. MODELO DEL LOCKHEED AQUILA.....	34
FIGURA 18. MODELO DEL MBLE EPERVIER.....	35
FIGURA 19. MODELO DEL COMPASS COPE	35
FIGURA 20. MODELO DEL WESTLAND WISP.....	36
FIGURA 21. EN LA IZQUIERDA EL CANADAIR CL-89, EN LA DERECHA EL CL-289.	38
FIGURA 22. EN LA IZQUIERDA EL CANADAIR CL-227 SENTINEL, EN LA DERECHA EL CL-427 SENTINEL	38
FIGURA 23. DEL LADO IZQUIERDO EL MODELO IAI SCOUT Y DEL LADO DERECHO EL MODELO IAI PIONEER	39
FIGURA 24. DEL LADO IZQUIERDO EL MODELO GNAT ATOMICS GNAT A Y DEL LADO DERECHO EL MODELO DENEL SEEKER II.....	40
FIGURA 25. MODELOS MÁS RELEVANTES EN LOS AÑOS 90. ARRIBA EN LA IZQUIERDA EL UAS VTOL YAMAHA RMAX, A LA DERECHA EL ZEPHYR, ABAJO EN LA IZQUIERDA EL HERTI Y DEL LADO DERECHO EL GLOBAL HAWK	41
FIGURA 26. EVOLUCIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS DEL UAS PREDATOR. ARRIBA A LA IZQUIERDA PREDATOR A, SEGUIDO PREDATOR B AL FINAL PREDATOR C.	43
FIGURA 27. LOS MODELOS DE LOS SISTEMAS DESARROLLADOS EN ESOS AÑOS, A IZQUIERDA EL UAS VTOL SCHIEBEL CAMCOPTER S-100 Y A LA DERECHA EL SCAN EAGLE DE BOEING/INSITU.....	45
FIGURA 28. VANT DJI PHANTOM 2 V2. MULTIROTOR.....	47
FIGURA 29. VANT HEVELUIS. FOTO GEON MAP	48
FIGURA 30.- MARCO O FRAME DE UN DRON.....	49

FIGURA 31. MOTORES, HÉLICES Y ESCs DE UN DRON	49
FIGURA 32. CONTROLADOR DE VUELO DE UN DRON.....	50
FIGURA 33.- RADIO RECEPTOR DE UN DRON.....	50
FIGURA 34. BATERÍA DE UN DRON.....	51
FIGURA 35. CÁMARA Y ESTABILIZADOR DE UN DRON	51
FIGURA 36. GPS DE UN DRON.....	52
FIGURA 37. IMU EN UN DRON	52
FIGURA 38. FOTOGRAFÍAS DE LOS COMPONENTES DE UN DRON DJI PHANTOM	53
FIGURA 39. MISIÓN PARA VUELO FOTOGRAMÉTRICO	71
FIGURA 40. ADVERTENCIA Y MENSAJES DE PRECAUCIÓN.....	72
FIGURA 41. PROCESO DE ALINEAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS.....	73
FIGURA 42. NUBE DE PUNTOS PRIMARIA	73
FIGURA 43. RENDERIZADO DEL MODELO	74
FIGURA 44. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	74
FIGURA 45. ORTORECTIFICACIÓN DE IMÁGENES	75
FIGURA 46. MOSAICO ORTORECTIFICADO	75
FIGURA 47. ANÁLISIS DE TRASLAPES Y DETALLES TÉCNICOS DE LA ORTOFOTO	76
FIGURA 48. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE LA ORTOFOTO	77
FIGURA 49. ERRORES EN EL PLAN DE VUELO DE LOS EJES X, Y, Z.	78
FIGURA 50. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE LA ORTOFOTO	79
FIGURA 51. PARÁMETROS DE PROCESAMIENTO.....	80
FIGURA 52. COMPARATIVA MÉTODOS TOPOGRÁFICOS Y FOTOGRAMÉTRICOS	84

Índice de tablas

TABLA 1. VUELOS CONOCIDOS EN DIVERSOS PAÍSES.....	25
TABLA 2. ETAPAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MODELO PREDATOR	42
TABLA 3. DATOS PARA GEORREFERENCIA DE PROYECTO.....	82
TABLA 4. COMPARACIÓN CON EL MÉTODO DIRECTO, PUNTOS TOMADOS CON ESTACIÓN TOTAL	83

Resumen

El encuadre del siguiente trabajo consiste en la explicación detallada del uso de los ya conocidos y denominados drones, para obtención de información, como lo son productos cartográficos y sus aplicaciones en la ingeniería, se puede observar que con el desarrollo de la tecnología, los métodos tradicionales fotogramétricos se han modificado, ya que la implementación de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), han permitido que se desarrollen nuevos métodos de trabajo y se obtengan resultados los cuales permiten su aplicación en el área de la Ingeniería. Con esta valiosa información, se pueden tomar decisiones para mejorar notablemente los proyectos.

En México desde hace tiempo estas técnicas de recolección y recopilación de información se han estado desarrollado, por lo que debe considerarse que seguirá en aumento conforme el avance tecnológico incrementa. También es importante considerar que estas técnicas modernas de fotogrametría deben tener un flujo de trabajo que considere los aspectos de precisión y exactitud en comparación con los métodos tradicionales de la fotogrametría y topografía.

Este panorama de aplicaciones en las mediciones tiene amplio campo de interés, se puede utilizar en inspecciones técnicas de estructuras, en la topografía, en la cartografía, y en la obtención de volúmenes de acopio de material y representa una ventaja amplia contra los métodos tradicionales ya que el tiempo y las precisiones obtenidas están dentro de los parámetros requeridos por los trabajos y minimizan los riesgos de trabajo.

El presente documento establece los fundamentos técnicos y teóricos de la fotogrametría necesaria para comprender la técnica, además de describir el proceso de aplicación y el flujo de trabajo empleado, considerando desde la planificación hasta la presentación de los resultados.

Se analizarán los posibles casos de aplicación que describan los procesos del flujo de trabajo y su procesamiento para se puedan considerar los aspectos técnicos y requerimientos para los proyectos y puedan servir de guía para su posterior empleo, para proyectos de condiciones similares y se vaya actualizando según los avances tecnológicos de la técnica.

Introducción

Los avances tecnológicos, como la digitalización y la automatización, han simplificado tareas que antes eran complejas debido al uso de métodos tradicionales.

La tendencia actual en topografía incluye la implementación de drones, los cuales aprovechan los sistemas de posicionamiento por satélite para facilitar y asegurar la recolección de información en el campo.

La implementación de drones se ha vuelto una tendencia debido a que esta tecnología incorpora sistemas de posicionamiento por satélite, lo cual facilita y asegura la recolección de información en el campo, generando resultados de mayor calidad en cuanto a la exactitud de los datos recolectados y representando de manera más fidedigna el terreno.

Es importante tener en cuenta que estas tecnologías, al igual que cualquier otra técnica, tienen sus limitaciones en el campo y su correcto uso está determinado por:

- Las condiciones físicas del terreno.
- Los factores climáticos, así como.
- Las necesidades del proyecto.

Todo esto está directamente relacionado con el alcance del proyecto, los recursos y el tiempo disponibles para obtener el nivel de precisión exigido.

El empleo de drones permite la obtención de fotografías que, a través de un proceso de ortorrectificación, generan un mosaico georreferenciado. Este mosaico servirá para crear modelos digitales de terreno y representar la cartografía de superficies del terreno. Sumado al desarrollo de programas informáticos, esto permite que las técnicas anteriormente empleadas en la fotogrametría se adapten al desarrollo tecnológico actual y puedan tener aplicaciones en el campo de la ingeniería topográfica, ingeniería civil y arquitectura.

Objetivo del Estudio

El objetivo del presente estudio consiste en analizar el flujo de trabajo empleado en los proyectos de fotogrametría digital con el uso de drones y, al mismo tiempo, establecer si los resultados obtenidos tienen la precisión adecuada para poder ser usados como base en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

En los últimos años, el uso de esta técnica de obtención de información ha tomado ventaja sobre los métodos tradicionales porque supone una significativa reducción de los tiempos de trabajo y es más económica que la fotogrametría tradicional, sin embargo, no debe olvidarse que esta no sustituye a la topografía clásica, ya que esta última es fundamental.

En la siguiente sección, se hará una descripción del estado actual de la problemática y se revisará históricamente el desarrollo de estas técnicas para comprender su evolución y sentar las bases para su estudio en la época actual y sus posibles desafíos a futuro. Se delimitarán los alcances del presente estudio, se planteará la perspectiva del objeto de estudio, así como se darán a conocer sus limitaciones y la justificación para la realización de este.

En el primer capítulo se analizarán los fundamentos teóricos, se proporcionarán definiciones formales de la fotogrametría, se establecerá el marco de referencia, se detallarán los métodos empleados en la obtención de información y se discutirán todos los aspectos necesarios para tener en cuenta en el empleo de la fotogrametría y aquellos que son indispensables para obtener la calidad en los trabajos.

En el segundo capítulo, ya con las bases teóricas de la fotogrametría, se analizarán los casos en los que la aplicación de este método resulta conveniente en comparación con otros, cuáles son los resultados que se han obtenido y cuál es la tendencia en la aplicación de este método en la resolución de problemas.

En el tercer capítulo, se analizarán los casos de empleo de la fotogrametría con drones, se abordarán aspectos relacionados con la metodología y la planificación de las actividades necesarias de los equipos empleados y de sus características, los pros y contras del uso de determinados equipos frente a los requisitos de un trabajo específico, hasta llegar a desarrollar el flujo de trabajo y obtener la información necesaria, así como la presentación de dicha información para validarla y poder analizar la calidad en términos de exactitud y fiabilidad del método empleado.

En la parte final se hará un recuento de los productos obtenidos y sus distintas aplicaciones. En los aspectos generales, se analizará la precisión del flujo de trabajo y de los métodos empleados, se examinarán los factores de tiempo y costos, así como su aplicación para cada caso. Se presentarán conclusiones sobre los casos de estudio y se compararán las recomendaciones sobre el empleo y la aplicación de este método de trabajo con miras al desarrollo futuro de las nuevas tecnologías.

Antecedentes

En los entrenamientos de la Segunda Guerra Mundial, los pilotos de aviones también los utilizaron para la práctica de ataques en la modalidad aire-aire, lo que les permitió mejorar sus habilidades durante los combates. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, se lograron avances tecnológicos que permitieron su empleo en el campo de batalla.

A medida que las tecnologías mejoraban, las aeronaves sin piloto se transformaron en plataformas de reconocimiento para recopilar información de inteligencia, las cuales se emplearon en el periodo de la Guerra Fría (1953 – 1962), así como en los conflictos con Corea y Vietnam (1954 - 1975). Durante los primeros días de uso, las aeronaves a control remoto a menudo se consideraban poco fiables y costosas.

Las agencias gubernamentales de los Estados Unidos, el ejército, la NASA, las agencias de inteligencia y las industrias comerciales expandieron la investigación y el desarrollo durante la década de 1970. En la década de 1980, algunos aviones no tripulados fueron utilizados por militares para tareas de reconocimiento en tiempo real e interferencia electrónica, y comenzaron a ser armados con municiones de precisión. La NASA, la NOAA y otras agencias científicas también estaban utilizando estas tecnologías y capacidades para fines de investigación científica (Delgado, 2016).



Figura 1. Ames Astrogram febrero 2022.

Fuente: Dominic Art.(<https://www.nasa.gov/>).

Breve historia de los Drones

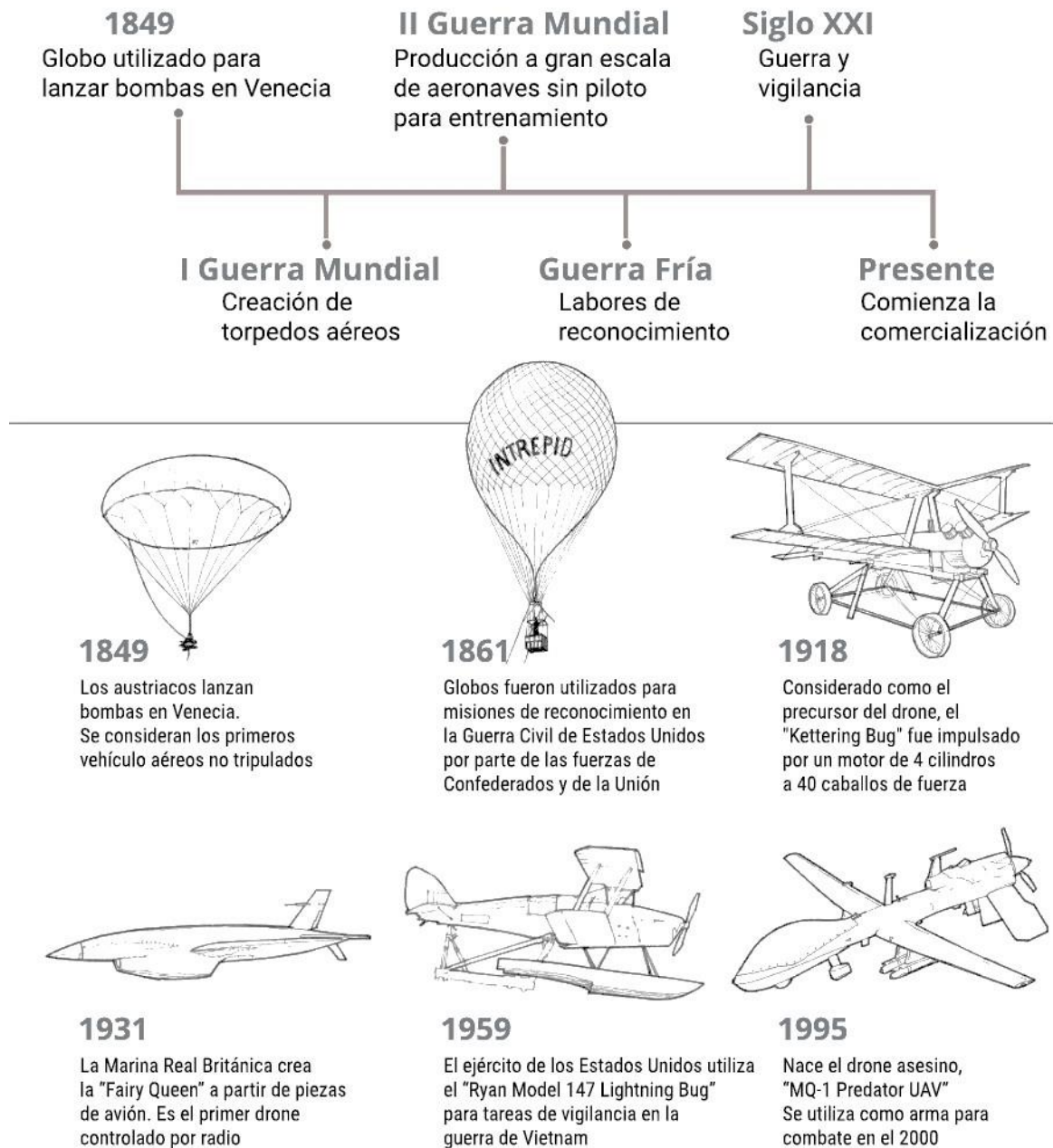


Figura 2. Infografía de la evolución de los drones

Fuente: *drones.mx*

Hoy en día, los modelos de uso civil más avanzados tienen la capacidad de volar de forma estable y autónoma, además de ser confiables en la recolección de información variada gracias a los sensores con los que están equipados para almacenarla y transmitirla. Por eso, su producción ha aumentado y se venden al público en general. También existen empresas dedicadas a su empleo en aplicaciones en el área de la Ingeniería.

Justificación

La realización del presente proyecto tiene como objetivo analizar la metodología empleada en la obtención y recolección de información geoespacial mediante el uso de UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) y verificar su calidad, para su posterior aplicación en campos relacionados con la Ingeniería Topográfica y otras ramas de la ingeniería.

En el proyecto se considerarán aspectos como el análisis de las herramientas empleadas, es decir, el software y los dispositivos utilizados, los cuales, según la tendencia en el avance tecnológico, seguirán siendo empleados en campos como la industria minera, proyectos de infraestructura vial, cartografía, supervisión y control de obras civiles, así como en arquitectura.

A través del análisis de diferentes casos de aplicación y la evaluación de los resultados, será posible tomar decisiones fundamentadas basadas en las precisiones de los cálculos obtenidos a partir de la recolección de información.

Estos métodos modernos de fotogrametría generan una alternativa a los métodos convencionales de medición y recopilación de información geoespacial, lo cual mostrará la eficiencia, rapidez y precisión obtenidas.

Este proyecto servirá como una guía de referencia que busca ejemplificar campos de aplicación para considerar a los UAVs como una herramienta valiosa en trabajos topográficos y que, conforme avance la tecnología, se espera que se desarrolle con el tiempo y revolucione diversas áreas de aplicación.

Objetivos Generales

1. Verificar la metodología empleada para el desarrollo de actividades topográficas con UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) y analizar la exactitud y calidad de la información geoespacial para su posterior empleo en áreas de Ingeniería Topográfica.
2. Analizar los casos de estudio en los que la recolección de información geoespacial con UAVs se aplica a proyectos de ingeniería, utilizando software para el procesamiento de imágenes y la producción de ortofotos.

Hacer de este documento una referencia para quienes emplean estos métodos de recolección de información geoespacial y los aplican en cualquier área que se analice.

Objetivos específicos

- Determinar qué precisiones se obtienen con los levantamientos fotogramétricos.
- Determinar qué factores intervienen en la precisión de los trabajos.
- Definir qué aplicaciones tienen en la Ingeniería Topográfica.
- Conocer la metodología del flujo de trabajo.
- Identificar cuáles son los criterios de validación para la información obtenida.

Alcances

El proyecto analizará los casos de aplicación y la validación de la investigación basándose en información disponible y confiable, extraída de fuentes como trabajos de tesis relacionados con el tema. A partir de estas referencias, se plantearán respuestas a las principales preguntas que se intentan aclarar en este estudio.

Limitaciones

En relación con las limitaciones de este proyecto, el enfoque central se centrará únicamente en las aplicaciones que guarden relación con la ingeniería topográfica. Si bien el uso de UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) se ha incrementado en diversas actividades y es probable que continúe creciendo en el futuro, este estudio se limitará a evaluar exclusivamente la precisión de los datos obtenidos y su aplicación en la ingeniería topográfica.

Metodología

El proyecto tiene como objetivo principal analizar las aplicaciones y la validación de la investigación relacionada con el uso de UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) en el ámbito de la topografía. Se enfocará en la precisión de los datos obtenidos y su aplicación en esta disciplina.

La metodología se basa en la aplicación de la fotogrametría aérea en los levantamientos topográficos e ingeniería topográfica, utilizando fotografías capturadas con UAVs. Esta metodología abarca tres etapas clave: la planificación del vuelo, la recolección de información y el procesamiento de datos. Cada etapa se describe en detalle en este estudio.

El propósito es proporcionar información y guía básica sobre la metodología de uso de UAVs en la adquisición de información geoespacial a través de fotografías aéreas.

Se detallará la planificación del vuelo, la calibración del equipo y las recomendaciones para el desarrollo de trabajos en campo y en la oficina.

Se busca comprender las bases teóricas de la información proporcionada en las etapas de vuelo y procesamiento de datos para una mejor comprensión de los elementos involucrados.

Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de fuentes, como libros, revistas, tesis, manuales y otros recursos tanto a nivel nacional como internacional, para respaldar teóricamente la investigación.

Además, se analizarán los resultados de las experiencias de investigación realizadas en todas las etapas de producción de información geoespacial.

La información recolectada en el campo se obtendrá mediante vuelos fotogramétricos con puntos de control establecidos en cada trabajo. Las fotografías aéreas se tomarán utilizando un UAV, específicamente el modelo DJI Phantom 3 Profesional. Este dron cuenta con características que incluyen un peso de 1280 g, una cámara de 12 megapíxeles y un sistema de navegación autónomo GLONASS + GPS para georreferenciar imágenes.

El control terrestre se llevará a cabo utilizando un GPS RTK, que establecerá la posición mediante un sistema de navegación cinética satelital en tiempo real. Estos puntos de apoyo terrestre (GPC) deben ser visibles en las fotografías tomadas por los drones y servirán para asociar las coordenadas reales de un punto en el terreno con las coordenadas correspondientes en las fotografías.

Para procesar la información recolectada, se utilizará el software Pix4D, que se emplea para producir ortofotos y modelos digitales de terreno. Este software ofrece una precisión 3D centimétrica y utiliza el concepto "rayCloud" para combinar la nube de puntos 3D con las imágenes originales, lo que permite la edición y corrección de proyectos. Los resultados son compatibles con software GIS, CAD y otros programas de fotogrametría tradicional.

Se analizarán los resultados de los procesos de vuelo fotogramétrico y procesamiento de datos para validar la calidad de los resultados obtenidos en comparación con levantamientos topográficos convencionales. Se compararán tiempos de recolección de información, procesamiento de datos, precisión y costos.

Al finalizar el proyecto, se divulgarán los resultados, la metodología utilizada, las conclusiones y las recomendaciones derivadas del análisis de los flujos de trabajo realizados.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 Topografía. Conceptos y fundamentos básicos

La topografía, en general, se puede definir como una aplicación de la geometría. Esta ciencia permite comprender la superficie terrestre a través de mediciones utilizando los tres elementos del espacio, que pueden ser dos distancias y una cota, o una distancia, un ángulo y una cota (García, 2017).

Es una ciencia aplicada que tiene como punto fundamental establecer las posiciones relativas o absolutas de los lugares en la superficie terrestre. Además, implica la descripción gráfica en un plano de una fracción limitada de la esfera terrestre. En otras palabras, la topografía estudia las técnicas y operaciones para realizar mediciones sobre las propiedades y su representación gráfica o analítica a una escala fija (García, 2017).

También se encarga de llevar a cabo replanteos, que son el trazado de puntos coordinados, en las propiedades para la construcción de diversos proyectos de ingeniería. Esto se realiza en función de las condiciones de trabajo determinadas en un plano. En el mismo contexto, la topografía se utiliza para realizar trabajos de deslinde, segregación de tierras (agrodesia), catastro rural y urbano, así como levantamientos y trazos en proyectos mineros (García, 2017).

1.2 Planimetría y Altimetría

La topografía se relaciona directamente con la superficie plana de la Tierra, mientras que la geodesia se encarga de estudiar una gran extensión de la misma para generar una configuración precisa y a escala. Sin embargo, cuando se consideran áreas más pequeñas de representación, la topografía se encarga de llevar a cabo acciones que permiten delimitar y describir gráficamente a través de mediciones directas. Estas mediciones son utilizadas en el perfeccionamiento de acciones relacionadas con el desarrollo de disciplinas multidisciplinarias de ingeniería (Montes, 2013).

La representación de la superficie terrestre, incluyendo todas sus formas y características, tanto en su posición en un plano horizontal como en sus alturas o cotas, se logra a través de las curvas de nivel (Montes, 2013).

En resumen, la planimetría se enfoca en determinar las posiciones de los puntos utilizados para representar una superficie de terreno en el plano XY. Por otro lado, la altimetría se concentra en medir las diferencias de altura entre puntos en la superficie y se refiere a esta operación como nivelación.

La altimetría es la parte de la topografía que se dedica a establecer las diferencias de altitud o altura entre puntos en la superficie. A estas alturas se les denomina cotas y niveles en una zona de referencia.

"Las alturas de los puntos se toman con respecto a un plano de referencia, que puede ser un plano existente o uno definido por nosotros. El plano de referencia más común es el nivel medio del mar" (Montes, 2013, p. 79).

El objetivo de un levantamiento topográfico es calcular áreas, volúmenes y representar gráficamente las mediciones realizadas en el campo, utilizando perfiles y planos. Estos trabajos están inmersos en el campo de la topografía y se pueden dividir como se describe a continuación:

Clases de levantamientos. Estos pueden ser topográficos o geodésicos.

- Levantamientos topográficos. Estos son aplicables a áreas relativamente pequeñas y pueden realizarse sin considerar la curvatura de la Tierra, sin que se produzca un error apreciable (Montes, 2013, p. 1).

- Levantamientos geodésicos. Estos son necesarios cuando se trabaja en grandes extensiones de terreno y es crucial tener en cuenta la curvatura de la Tierra (Montes, 2013, p. 1).

1.3 Clasificación de levantamientos topográficos

Las aplicaciones que tienen los levantamientos topográficos, son diversas y tienen extenso impacto en la mejora de proyectos ingenieriles, por lo que se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **“Levantamientos topográficos:** estos determinan la ubicación y características de una superficie de terreno, sus accidentes naturales y artificiales, así como las elevaciones usadas para la elaboración de planos” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).
- **“Levantamientos de control:** estos se emplean para servir de referencia al desarrollo de trabajos topográficos en los proyectos, pueden ser tanto de control horizontal como vertical” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).
- **“Levantamientos catastrales de terreno y de linderos:** normalmente se tratan de levantamientos de superficies de terreno definidas por sus vértices los cuales establecen los límites de propiedad de terreno o de construcciones” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).
- **Levantamiento hidrográfico:** delimitan las líneas de playa y las profundidades de lagos, corrientes de agua, océanos, presas y cualquier otro cuerpo de agua. “Los levantamientos hidrográficos, se emplean para proyectos de levantamientos de bahía, puertos, lagos o ríos, actualmente se emplean en la construcción de plataformas marinas asociadas con líneas de conducción de hidrocarburos” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).
- **“Levantamientos de supervisión en la construcción:** determinan las líneas de referencias, la pendiente, los bancos de nivel, las dimensiones y la ubicación de los elementos a construir y permite tener al día el avance del proyecto” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).
- **“Levantamientos de planos AS BUILT:** estos sirven para documentar la ubicación final y exacta de los trabajos realizados, registran los cambios de diseño que se hayan realizado durante la construcción de algún elemento, la importancia de estos levantamientos radica en ubicar las instalaciones de los servicios subterráneos que se construyan para evitar su daño en un futuro, cuando algún otro proyecto se realiza en esa zona” (Wolf & Ghilani, 2016, p.11).

- **Levantamientos industriales:** estos levantamientos sirven como procedimiento para la ubicación de maquinaria industrial, exigen un grado de precisión milimétrica (Wolf & Ghilani, 2016, p.12).
- **“Levantamientos fotogramétricos y geodésicos:** estos trabajos integran mediciones electrónicas y el apoyo de fotogrametría, así como sistemas GPS. La ventaja en el uso de estas técnicas se basa en el empleo de equipos de alto rendimiento para trabajos topográficos como drones y/o GPS, lo que facilita la toma de datos en campo, con una eficiencia mayor y una precisión dentro de los estándares de la topografía convencional” (Wolf & Ghilani, 2016, p.12).

Para el análisis de la fotogrametría se maneja el uso de cámaras de gran resolución lo que permite obtener productos cartográficos y topográficos confiables, utilizando softwares que procesan las ortofos y modelos digitales de elevación. Su uso se aplica tanto para territorios extensos de terreno como para territorios pequeños.

1.4 Fotogrametría. Conceptos y fundamentos básicos

Se podría sintetizar que la Fotogrametría es una técnica de: “levantamiento indirecto, que permite medir y registrar coordenadas tridimensionales y producir representaciones muy precisas (gráficas o fotográficas) de todo tipo de objeto, cuya imagen o imágenes puedan ser registradas mediante rayos de luz sobre soportes analógicos o digitales” (Cheli, 2011, p.25).

El saber del aspecto fotogramétrico abarca técnicas de fotointerpretación y cálculo a través de imágenes fotográficas para la descripción gráfica-técnica de la forma y ubicación espacial de algún elemento o cosa. Desde el inicio de la Fotogrametría Digital, el restablecimiento digital de los objetos en 3 dimensiones se ha centrado en el principal objeto.

“La fotogrametría puede ser empleada en diferentes ámbitos del conocimiento, por ejemplo, la Cartografía, estudios geofísicos y geológicos, investigaciones forestales, planeación urbana, estudios catastrales, diseño y construcción de carreteras, estudios sobre el estado de recursos naturales” (Wolf & Ghilani, 2016, p. 790).

Se considera que es un arte de medición en la que a través de tratamiento digital de fotografías se logra conseguir las características geométricas de las cosas y de una zona de terreno. De acuerdo a

(Santamaría & Sanz, 2011) definen a la fotogrametría como: “*un conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales se puede deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones. Sus principios se basan en la geometría proyectiva y la visión estereoscópica*” (p. 9).

1.5 Ventajas de los levantamientos fotogramétricos

El provecho que se desprende de la fotogrametría tiene que ver con los puntos que se describen en la parte de abajo:

- Se logra conseguir datos sumamente precisos y actualizados del sitio de estudio.
- Se adquiere paralelamente información relativa a la planimetría y a la altimetría.
- El precio en las operaciones de trabajo es respectivamente bajo en contraste con las técnicas usadas con anterioridad.
- Se ajusta el tiempo de la manufactura de resultados.
- Permite efectuar trabajos en sitios de dificultoso camino.

1.6 Fotogrametría terrestre

Concierne al empleo de fotos que fueron tomadas de forma horizontal y vertical a la superficie. Se logran efectuar mediciones encima de ellas, pero muestran problemas con respecto al uso de su escala. Presentan múltiples aplicaciones en proyectos para disciplinas como la arquitectura y la arqueología.

Este arte se fundamenta para su aplicación en saberes referentes a la parte arquitectónica y la arqueológica. Su principio se cimenta en la captura de fotos en tomas de forma horizontal y vertical a los planos de los cuales se intenta adquirir sus mediciones.

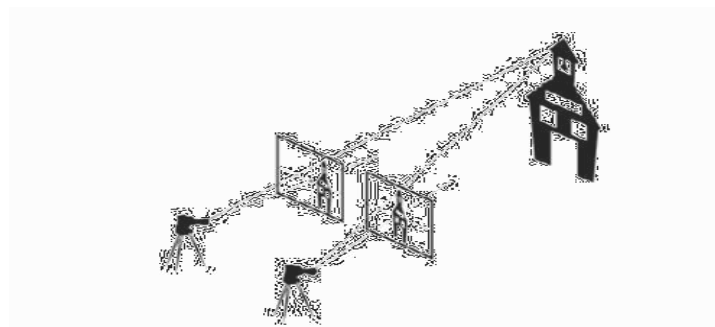


Figura 2. Fotogrametría terrestre en la medición de fotogramas horizontales

Fuente: Elaboración propia

1.7 Fotogrametría aérea

Esta disciplina pertenece al uso de fotos verticales conseguidas con un sensor remoto ubicado en la parte inferior de un avión, donde el eje óptico del sensor resulta perpendicular al plano terrestre.

Desde la adquisición de la primera foto en 1827 por Joseph Niepce, comenzó el interés por manejar fotos como un instrumento aplicado a la Topografía.

Las primeras experimentaciones con fotos en levantamientos topográficos, e incluso con fotos verticales conseguidas con la ayuda de globos y cometas, iniciaron en 1849 con Aimé Laussedat.

Al mismo tiempo se desarrolló el primer aparato adecuado para levantamientos fotogramétricos y la primera técnica de restitución (fabricación de cartografía apoyada en fotos aéreas). Aimé Laussedat es considerado el Padre de la Fotogrametría.

En los siguientes períodos, la aplicación militar de la Cartografía impulsó un gran progreso y el surgimiento de la segunda etapa.

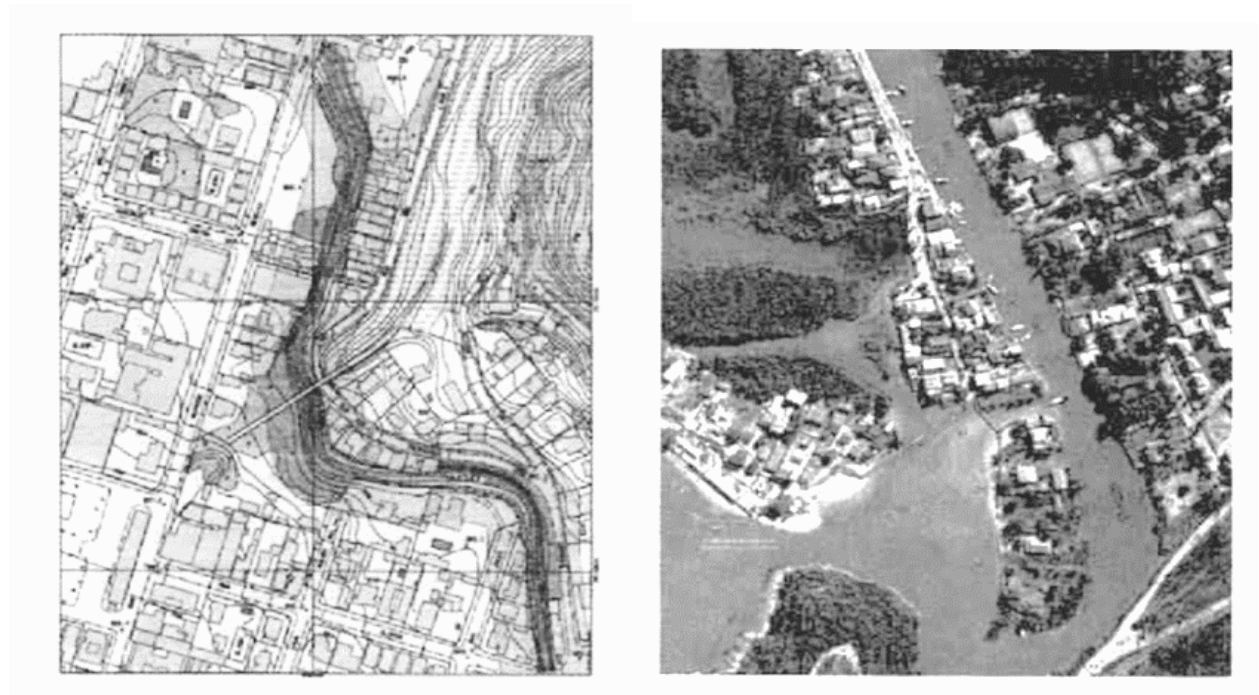


Figura 3. Ejemplos de cartografía basada en imágenes aéreas.

Fuente: Elaboración propia.

Según el método que se haya utilizado, se puede catalogar en tres formas la fotogrametría:

- Fotogrametría analógica.
- Fotogrametría analítica
- Fotogrametría digital

1.8 Clasificación de la fotogrametría

1.8.1 Fotogrametría analógica

Tiene fundamento en el manejo de restituidores óptico-mecánicos, donde el especialista ejecuta un alineamiento de los fotogramas para obtener un modelo 3D perfectamente nivelado y escalado. El cimiento de la fotogrametría analógica se apoya en constituir un haz o vector en apariencia entre el sensor remoto y el objeto retratado, considerando que en la vía de este se localizan diferentes cosas como la cámara.

Los referentes rayos que se crean entre el punto de arranque y los elementos retratados, permiten la confluencia de haces similares fotografiados desde un punto focal diferente a cada uno de los puntos homólogos previamente retratados.

Entonces, se puede concebir como fotogrametría analógica la determinación concreta de un elemento en el espacio, a partir de fotogramas aéreos que se emplean para crear modelos en 3 dimensiones, con el objetivo de reformar el modelo espacial a través de sistemas óptico-mecánicos.

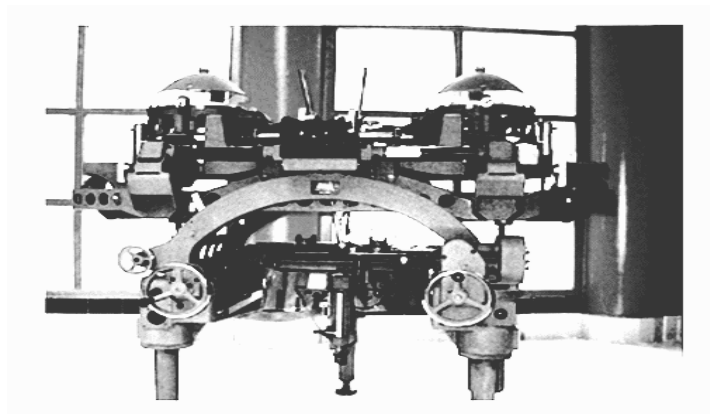


Figura 4. Restituidor analógico

Fuente: Elaboración propia

1.8.2 Fotogrametría analítica

En la fotogrametría analítica la forma de ejecución de datos se da analógicamente y el detallado geométrico es matemático, a través de un mono comparador o de un estereocomparador que va acoplando en el restituidor, se calculan los ejes coordenados x, y de los sitios en las fotos.

Son las coordenadas de estos sitios trabajadas en los softwares y estas efectúan el desarrollo de alineación interna y externa en modo analítico y desarrollan la recolección de los datos del modelo que ejecuta el especialista, para posicionarlo en su precisa posición ortogonal, además de respaldarlo en una base de datos relacionada con el CAD.

La Fotogrametría Analítica nació de la mano de los primeros ordenadores. Desde esta fase los cálculos se iniciaron a ejecutar de forma numérica, a través del posicionamiento de sistemas coordenados en las fotos.

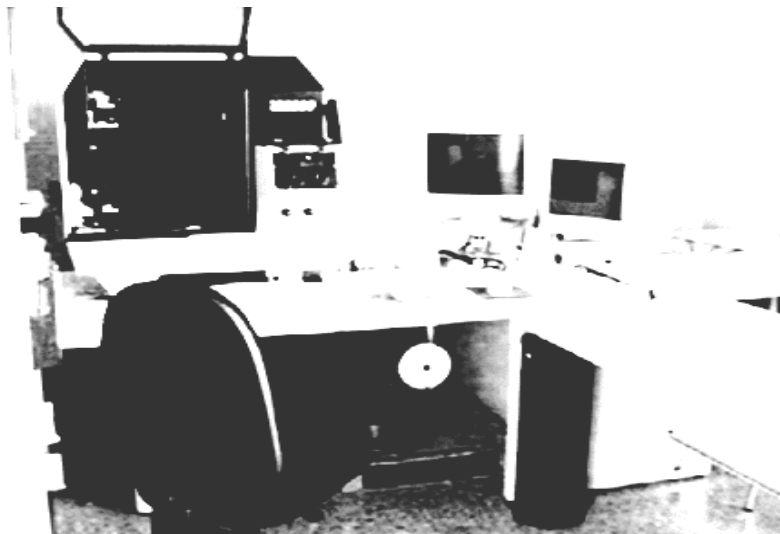


Figura 5. Restituidor analítico

Fuente: Elaboración propia

1.8.3 Fotogrametría digital

Las imágenes aéreas son escaneadas y trabajadas en dispositivos computarizados de reciente generación tanto en software como en hardware. Con el apoyo de estos aparatos se logran obtener imágenes armadas georreferenciadas y restauraciones de modelos digitales de terreno en tercera dimensión, cuyo estudio primordial se genera a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

De acuerdo a la secuencia cronológica nace en la década de los 90's con el manejo de fotografías digitales como semillero de información, con esta base los restituidores analíticos fueron sustituidos por ordenadores particulares, con amplitud de cumplimiento para generar propuestas a la correlación entre los sistemas coordinados de sitios medidos en las fotografías digitales y sus homólogos en campo, utilizando para eso la fórmula de colinealidad, y manejando esta técnica en la cartografía.



Figura 6.- Restituidor digital

Fuente: Elaboración propia

1.9 Breve desarrollo histórico de los drones

Fue en Europa donde se originaron los principios de la aeronáutica y los aplicaron a las aeronaves no tripuladas, esto se reprodujo en numerosos países del mundo, desarrollando planeadores no tripulados y planeadores tripulados. Su principal problema fue que su diseño del motor no guardaba una relación potencia-peso, que permitiera mantener en vuelo a los planeadores (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

Fueron los profesionales norteamericanos, quienes impulsados por el objetivo de poder aprovechar la tecnología en beneficio de sus intereses militares desarrollaron mejoras en esta tecnología, fue así como los hermanos Wright y su mecánico Charles Taylor, lograron con el empleo de un motor de 12 caballos de potencia y 80kg de peso, poder realizar un vuelo tripulado con avión propulsado, por otro lado fue la segunda guerra mundial la que propiciaría el desarrollo de esta

tecnología en Europa, el objetivo principal fue aviones de reconocimiento no tripulados con fines bélicos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

PAIS	PLANEADOR NO TRIPULADO	PLANEADOR TRIPULADO	AVION NO TRIPULADO	AVION TRIPULADO
Inglaterra	Cayley, 1809	Cayley, 1849	Cody, 1907	Cody, 1908
Francia		Ferber, 1901	Du Temple, 1857	Santos-Dumont, 1906
Alemania		Lilienthal, 1891		
Japon		LePrieur/Airbara, 1909	Ninomiya, 1891	Nagahara, 1911
Rusia				Rossinky, 1910
Estados Unidos		Chanute, 1896	Langley, 1896	Hnos., Wright, 1903

Tabla 1. Vuelos conocidos en diversos países.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

Se puede atribuir el nacimiento del concepto de un vehículo, aéreo no tripulado, Nikola Tesla, consideraba que el futuro de la aviación sería mediante el empleo de los dirigibles, los cuales se emplearon en los bombardeos de Inglaterra en los años 20. En 1898 inventó el “Telautomaton”, el cual podía avanzar, pararse, ir a derecha o izquierda hacer pestañear sus luces mientras enviaba diferentes frecuencias de radio. En 1912 modificó el prototipo con el cual nacería el concepto de torpedo radiocontrolado, por lo que se le consideraría el padre de los misiles crucero (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015) .

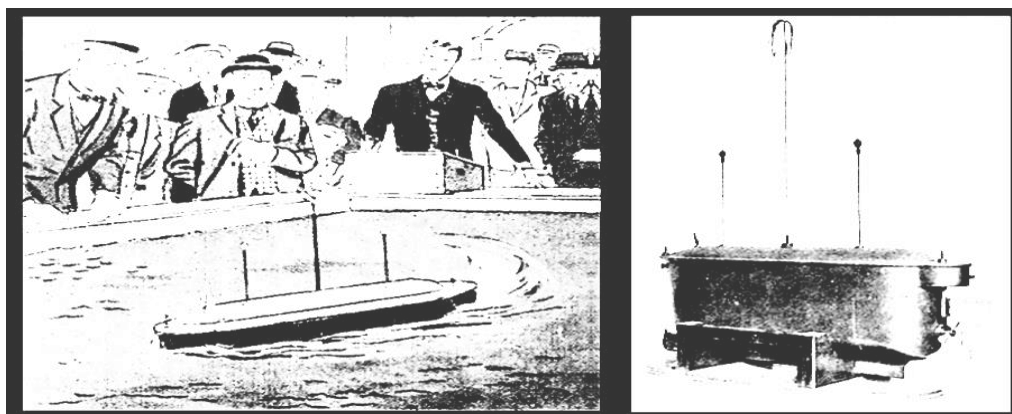


Figura 7. En 1898, se presentó a la primera Exhibición Eléctrica un bote miniatura controlado a distancia por radio

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

“En 1888, Louis Brennan inventor irlandés, demostró poder pilotear mediante un cable, un torpedo por el río Medway en Inglaterra, en 1908, el oficial de artillería francés Rene Lorin propuso

colocar una bomba volante, propulsada por chorro, parecido al diseño alemán V-1, controlado por radio” (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 18).

En la primera Guerra Mundial, la aviación inicio su progreso con rapidez, sin embargo, los vehículos no tripulados tenían poco desarrollo tecnológico, ya que sus inconvenientes se exhibían en el equilibrio automático, así como el mando a distancia y la navegación autónoma. Elmer Ambrose Sperry remedio los inconvenientes en los drones, tuvo éxito con giróscopos para estudios marítimos, esto lo llevó a inventar un giroestabilizador para una aeronave en el año 1909, no obstante, trascendió con restricciones debido a su peso y a su defectuoso trabajo (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

Por tanto, respaldado por el precursor de la aeronáutica, Glenn Hammond Curtiss, optimizo su proyecto y lo introdujo a ensayo en el año 1911. Este proyecto era más chico, con lo que se conseguía el timón de la aeronave en los tres ejes, articulándolo a los mandos de la aeronave a través de servomotores. En 1914 obtuvo una recompensa en una exposición en Francia, incluyendo los progresos en su diseño previo (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

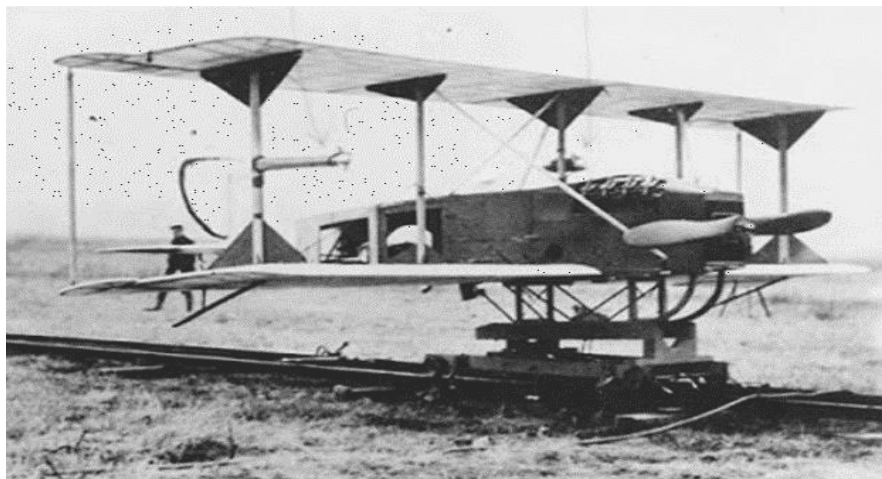


Figura 8. El torpedo aéreo Hewitt-Sperry sobre una catapulta instalada en una vía férrea.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid.

Para 1915 Sperry fue contactado por Cooper Hewitt, quien era inventor de sistemas, con el objetivo de retomar las ideas de Tesla, para esto usaron como base el dispositivo ideado por Sperry. En 1916 realizaron la primera demostración para guiar un avión convencional, el Hewitt-Sperry Automatic Airplane, sus características eran que el piloto despegaba antes de enganchar el autopiloto, después el avión iniciaba el vuelo del trayecto programado y picaba, entonces el piloto recuperaba el

avión y lo regresaba al aeródromo. La US Navy financio en 1917 esta idea y le otorgo cinco hidroaviones Curtiss N-9 para poder llevar a cabo el experimento (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

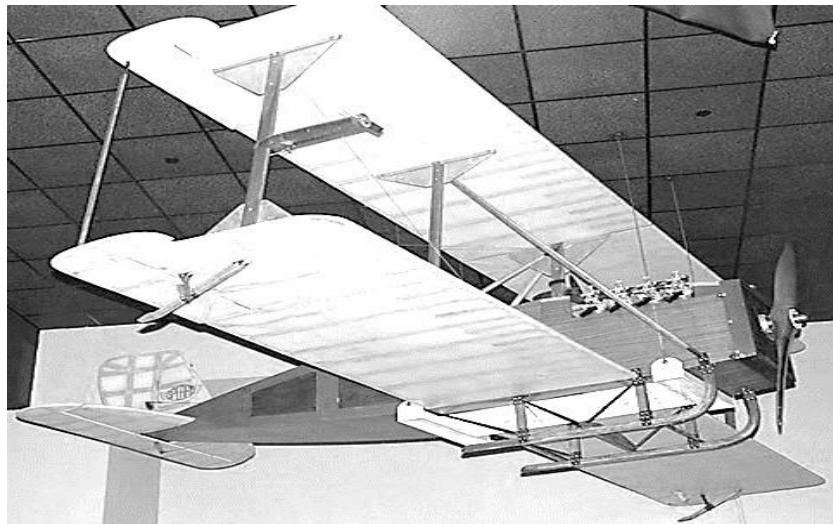


Figura 9. Modelo del Hewitt-Sperry Automatic Airplane.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

La compañía Curtiss Aeroplane and Motor Company empezó a fabricar células de vuelo para torpedos aéreos no conducidos, los primeros seis Speed Scout se entregarían a finales de 1917. Fue así que para el 6 de marzo de 1918 se realizaría con éxito el primer vuelo controlado de una aeronave no tripulada, 14 años más tarde de los hermanos Wright.

En octubre de 1918 se proveyó con una catapulta, el torpedo aéreo de Sperry era un bombardero biplano no conducido a base de madera, su peso era de 270 kg., incluyendo 136 kg de carga de explosivos el cual era impulsado por un motor Ford de 40 caballos de potencia.

Empleaba un método que consideraba la distancia al objetivo y la condición del viento, entonces se calculaban las revoluciones del motor que se necesitaban para llegar al blanco (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

“La aeronave se controlaba con un giroscopio simple el cual tenía incorporado un barómetro aneroide. Una vez alcanzadas y calculadas las revoluciones, desprendían las alas del fuselaje, dejando caer este a su objetivo” (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p.19).

En los inicios los sistemas fueron perfeccionados como equipo de extensa eficacia, por lo que se pueden considerar como predecesores de los misiles de crucero de la actualidad, algunos de estos desarrollados son el torpedo aéreo Liberty Eagle, popularmente conocido como “Bug” de Kettering en 1918 y el blanco aéreo británico “A.T.” Aerial Target desarrollado en 1914, las características del Kettering bug eran, un biplano ligero diseñado para transportar 82 kg. de explosivos y su funcionamiento era similar al torpedo Sperry, el A.T. británico se definía por ser un monoplano sin conductor, el cual era vigilado a distancia, poseía con un motor de 35 HP de fuerza, este sistema sirvió para explicar la viabilidad de utilizar señales de radio como sistemas de guiado para vigilar los vuelos de los aviones (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

Pese al éxito del desarrollo de estos dispositivos, no servían para ser empleados con fines militares antes del final de la I Guerra Mundial. Pero sellaron el principio de una nueva tecnología, que se desarrollaría en contra de sus prohibiciones sistemáticas originales. En la época de 1920, se reavivaron las necesidades de Gran Bretaña por los procedimientos de naves no tripuladas, fue la Royal Navy quien se interesó e impulsó una aeronave monoplaza capaz de transportar una carga de combate de 114 kg. Hasta una trayecto de 480 km, este efectuó su primer planeo en 1927, constituido de un motor Armstrong-Siddeley Lynx de 200 HP, que se nombró LARNYX (long-range gun with Lynx engine), transportaba un sistema de radio control para los primeros instantes de planeo, posteriormente planeaba según el vuelo de técnica concreta, de este tipo se erigieron 12 aparatos, 5 de estos estaban equipados con carga de combate y probadas en el desierto de Irak (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 10. Modelo del LARNYX (long-range gun with Lynx engine).

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.10 Segunda guerra mundial y desarrollo de los sistemas

En esta etapa Gran Bretaña toma la decisión de desertar en la mejora de misiles crucero y se cambia al perfeccionamiento de sistemas aéreos no tripulados, iniciaron a efectuar ensayos con el modelo Fairey, fue en la década de los años 30 y 40, que saltaron a erigir 420 modelos radio vigilados de un nuevo modelo nombrado “Queen bee”, consignado al uso de la Armada y el Ejército terrestre. Dicho modelo era la versión de la aeronave de madera del De Havilland Tiger Moth. Su uso fue ordinariamente para la formación y el entretenimiento de las fuerzas de la artillería de sus ejércitos en la Segunda Guerra Mundial (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 11. Modelo del Queen bee.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

Por su parte los EEUU creaban el RP4, de Radio Company, el cual se fabricó por miles como un sistema de adiestramiento del ejército de los EEUU. Con estas aeronaves se perfeccionó lentamente la tecnología y el uso de control remoto por radio. Alemania, por otra parte, manejaba el término de los misiles crucero, con el modelo V1 (Vergance Weapon). Ese fue el primer misil crucero provisto con un motor de reacción. Este sistema era regido como los sistemas previos, su metodología se fundamentaba en el uso de un barómetro el cual se utilizaba para ajustar la velocidad y altura, un anemómetro se utilizaba para calcular el trayecto recorrido. Se utilizó en los Países Bajos y en la fracción sur de Inglaterra (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

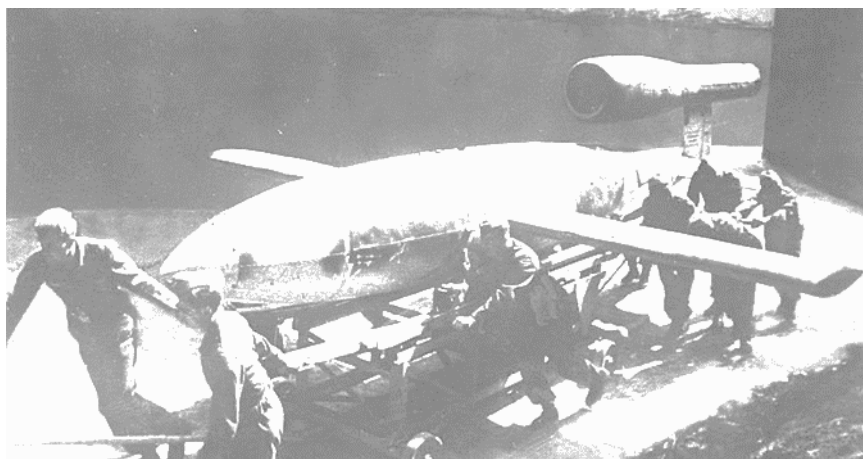


Figura 12. Modelo del V1 Vengeance Weapon alemán.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.11 Los años 50 y la guerra fría

"Fue en la época de la posguerra que se desarrollaron con éxito una serie de drones. El "Falcone" o "Shelduck", en particular, poseía un sistema de control más perfeccionado que las adaptaciones previas de drones. Estos drones se fabricaron con mucho éxito hasta la década de los 80 y obtuvieron la denominación BTT (Basic Training Target). También se crearon sistemas antirradar llamados "Crossbows", cuyo objetivo era enredar a los sistemas de radar contrarios. Estos dispositivos eran arrojados desde bombarderos y se controlaban por radio desde la nave lanzadora a través de imágenes de video" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

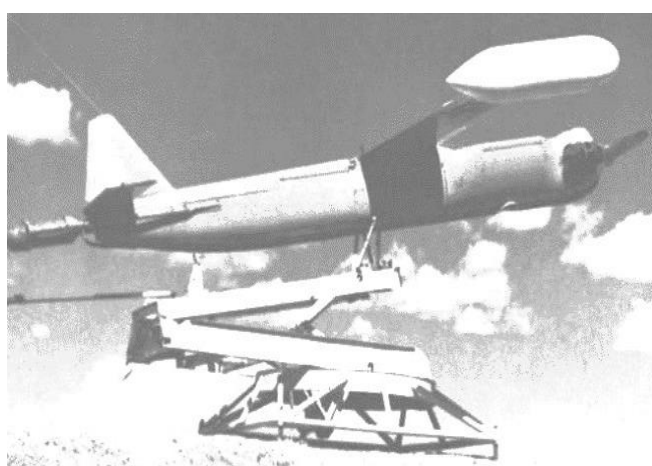


Figura 13. Modelos desarrollados en los 50. Del lado izquierdo el Northrop Falconer o Shelduck y en la derecha el Crossbow Decoy.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.12 Los años 60 y la guerra fría

Con el paso del tiempo y el mejoramiento de las aeronaves militares, se desarrollaron los sistemas de propulsión a reacción. Fue en estos años cuando se implementó el modelo "Ryan Firebee", el cual comenzó a finales de la década de 1950 con el propósito de transportar bombas para bombardear objetivos en tierra. El "Firebee" era otro tipo de UAV fabricado en ese período. Entre sus características, incluía equipamiento con cámaras de reconocimiento para sus misiones y operaba a altitudes elevadas, lo que permitía la comunicación en línea de visión desde una estación de control terrestre. También volaba a altitudes más bajas, donde era controlado desde una aeronave tripulada, lo que facilitaba la comunicación. Su objetivo principal era la captura de imágenes detalladas del territorio enemigo, lo que los convertía en dispositivos de vigilancia muy efectivos y evitaba posibles tensiones diplomáticas al no ser interceptados (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

Este diseño podía ser lanzado desde tierra mediante un motor cohete o desde una nave tripulada. Contaba con un sistema provisto de paracaídas para permitir su rescate en una zona segura de aterrizaje. Además, incorporaba modificaciones en el modelo, como un sistema antirradar, que le permitía llevar a cabo sus operaciones sin problemas. Con el paso de los años, estos sistemas evolucionaron y adquirieron la capacidad de volar a velocidades supersónicas, lo que los mantuvo como algunos de los mejores sistemas de UAV desarrollados. Continuaron en servicio hasta la actualidad, después de ser equipados con sistemas de navegación GPS y otras tecnologías modernas. A pesar de que su configuración no era la de un UAV tradicional, contribuyeron al desarrollo de estos sistemas UAV (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 14. Modelo del Ryan Firebee.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

La evolución de los diseños continuó en esa época. El modelo "Northrop" incorporaba un motor tipo turboreactor, más ligero que el del "Firebee". En su versión de los años 70, la versión MK.2 incluyó un avanzado sistema de autopiloto para operaciones más allá de la línea de vista (Beyond Line-of-Sight, BLOS). En algunos otros modelos se añadieron buscadores de radiación y cabezas de guerra antirradar (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 15. Modelo del Northrop Chukar.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

Se hace referencia al helicóptero "DASH" (Drone Anti-Submarine Helicopter) como el primer UAV de campo de combate de los EE.UU. Fue diseñado con el propósito de sobrevolar desde los buques de guerra de la Marina de Estados Unidos y transportar proyectiles y cargas nucleares, así como para combatir a submarinos hostiles que quedaran fuera del alcance de otras armas de la embarcación. Su sistema de control se basaba simplemente en el radiocontrol, por lo que no contaba con ningún autopiloto ni GPS. Su característica más destacada fue la incorporación de un ala rotatoria, al igual que otros UAVs. Varios de ellos se estrellaban en el mar, por lo que el programa se conoció como "splash-DAS-a-day". Por alguna razón, no se consideró un sistema de rescate para recuperar los equipos o tal vez el uso de un piloto automático hubiera hecho esto posible (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

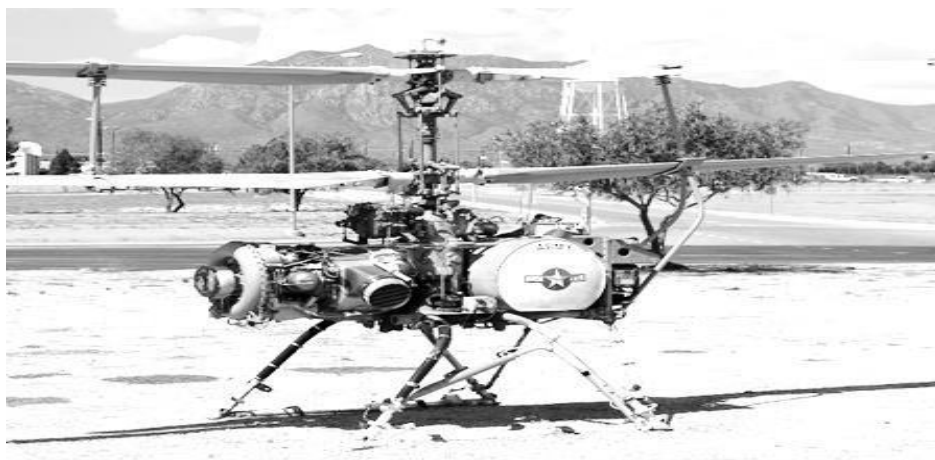


Figura 16. Modelo del UAS VTOL DASH.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.13 Los años 70 y las misiones de reconocimiento

"En esta época se introdujeron varios UAVs, diseñados para misiones de reconocimiento y vigilancia de corto y largo alcance, así como a gran altitud. Debido a la intensificación de la Guerra Fría, era necesario que los sistemas fueran más sofisticados" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 23). Por lo tanto, se produjeron excelentes sistemas seguros para las misiones, tanto en términos de seguridad como de comunicación. Otro sistema de corto alcance desarrollado fue el "Lockheed Aquila". Tenía un diseño pequeño, contaba con una hélice impulsada por un motor alternativo y una construcción modular. Capturaba información en vídeo y podía volar mediante un autopiloto. También estaba equipado con sensores para detectar y reconocer objetivos hostiles tanto de día como de noche. Además, podía señalar los objetivos para la artillería mediante el uso de un láser y era capaz de evadir las defensas aéreas soviéticas (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

"Uno de los problemas fue que, a pesar de que la estructura del avión podría haberse construido adecuadamente, se construyó de forma incompleta e inadecuada. Los métodos de los subsistemas necesarios para la construcción satisfactoria del tamaño específico del fuselaje no se fabricaron. En los ensayos de fabricación y perfeccionamiento del mismo, se encontraron con el hecho de que los subsistemas eran excesivamente pesados, de gran tamaño, requerían una fuerza enorme o sufrían obstrucciones mutuas. Esto se manifestaba en la calidad de la imagen debido a que la tecnología de espectro aún era incipiente, lo que degradaba la calidad del vídeo y obstaculizaba la identificación del objetivo" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015)..



Figura 17. Modelo del Lockheed Aquila.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"La aeronave se lanzaba desde una catapulta hidráulica. Entre algunas otras dificultades, existía también la recuperación de la nave. Se empleaba una red tendida entre dos postes para poder conseguirla. Sin embargo, debido a la precisión del guiado requerido para lograr esta maniobra, no estaba disponible, por lo que muchos aviones se destruyeron en el programa de pruebas. En condiciones de emergencia, se desplegaba un paracaídas, lo cual hacía que la aeronave pudiera descender, pero en esta maniobra resultaba dañada la estructura del avión.

Los aportes que logró este sistema fueron su capacidad de vigilancia y la designación de objetivos por medio del empleo de un láser. Otro sistema que se desarrolló fue el belga MBLE Epervier, el cual inició su desarrollo en 1960, pero no entró en operación hasta finales de los años 70. Contaba con un pequeño equipo turborreactor. Se lanzaba desde una rampa con un cohete y se recuperaba con un paracaídas. Su vuelo era por medio de un autopiloto preprogramado, asistido por radioenlace. Contaba con cargas de pago que consistían en cámaras diurnas o escáneres infrarrojos que grababan a bordo para luego ser procesadas en la estación terrestre" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

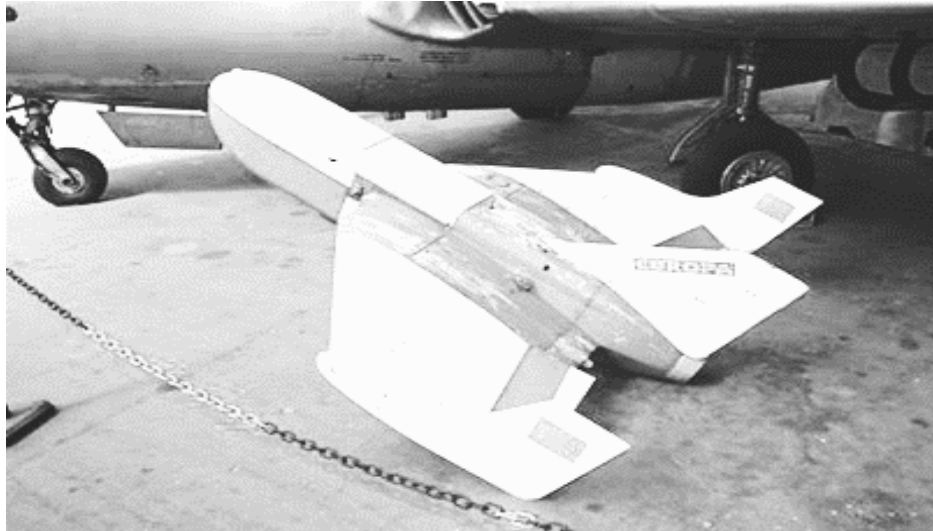


Figura 18. Modelo del MBL Eepervier

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

El UAS HALE (High Altitude – Long Endurance; elevada altitud y gran autonomía) Boeing Gull, gana la competencia de Compass Cope de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, para desarrollar un sistema HALE de reconocimiento, su objetivo era conseguir adquirir 16,770m de altitud, tener una independencia de 20 horas y trasladar un cargamento de peso de 680 kg., el cual contenía material para reconocimiento fotográfico, relé de comunicaciones e inteligencia de señales (SIGINTS; Signal Intelligence) en un alcance de 300 km día y noche, con cualquier condición climática (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

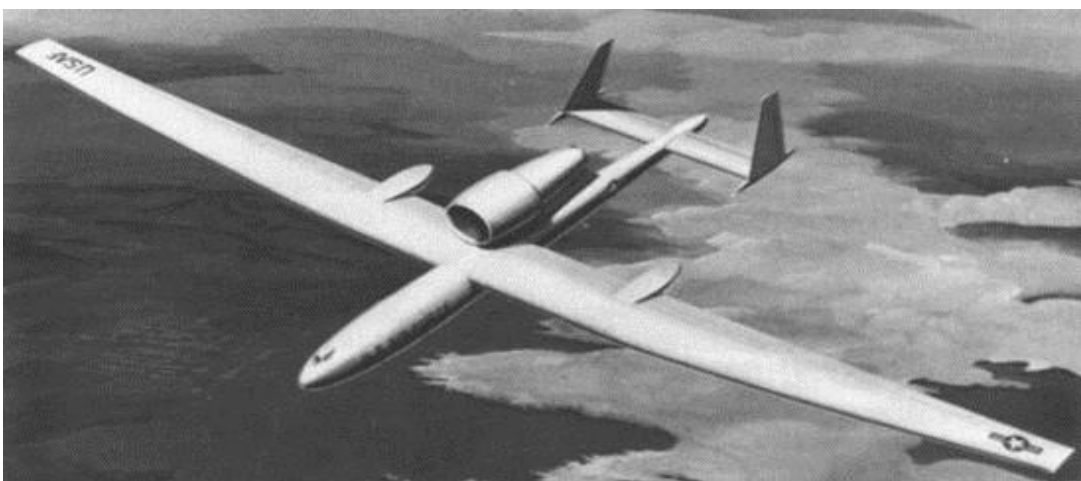


Figura 19. Modelo del Compass Cope

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

Este ejemplar fue llevado al aire de manera manual, controlado directamente por radio, aunque su régimen fue trazado para llevar a cabo ascensos y descensos automáticos, con el control de misión fundado en piloto automático. El programa se inhabilitó para el año 1977 por no desarrollarse satisfactoriamente las cargas de pago, fue 10 años posteriormente que se pretendió aplicar otro sistema de este ejemplar, al cual se le unió una tecnología de vanguardia, con la peculiaridad del uso del GPS para poder navegar de manera libre (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

Durante el desarrollo de estos sistemas en estas épocas, se consideraba el hecho de que debido a los problemas de lanzamiento y recuperación de UAVS, muchos de los programas hayan desaparecido o hayan sido cancelados.

Entonces el fabricante Westland y otros consideraron un despegue vertical para las operaciones de corto alcance, entonces el sistema Westland Wisp fue diseñado por requisición del Ministerio de Defensa del Reino Unido, el sistema debía de ser de corto alcance, por lo que el sistema utilizaba un pequeño piloto automático basado en giróscopos para mantener la estabilidad y era operado de forma manual por radio-control en línea de vista directa, contaba con una cámara de TV diurna, la cual enviaba imágenes en tiempo real al operador, se implementó una configuración de rotores coaxiales en este sistema, tres aviones consiguieron volar y con ello solucionar los inconvenientes de lanzamiento y salvación, ayudaron a dar idea de las primacías que supone tener una aforo de vuelo a punto fijo durante las misiones de cuidado (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 20. Modelo del Westland Wisp.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.14 Los 80 y la expansión internacional de los RPAS

Los sistemas de la serie Canadair CL-89 y CL-289 son sistemas de vigilancia los cuales fueron desarrollados durante varias décadas, su perfeccionamiento inicio la década de los años 60's, fue en los años 70 que operaron en forma preliminar, con el paso de los años su diseño fue mejorando en los 80 y en los 90 entraron en servicio con un rediseño, se han mantenido en función hasta el año 2000.

El sistema precursor fue el CL-89, el cual se desplegó para suministrar agudeza sensorial sobre zona enemiga, el cual lograba ser manejado en un radio de 70 km. El dron era propulsado con un motor cohete de combustible, a través de una rampa y se podía rescatar con un paracaídas airbag. En sus quehaceres diurnos estaba provisto con una cámara convencional más otra de infrarrojos de barrido lineal, para la noche solamente contaba con cámara infrarroja. Su bosquejo requirió que pudiese superar los sistemas de defensa del contrario; por lo que su bosquejo contaba con un área reducida (0.33 m), alas de 0.94 m. de extensión y una gran rapidez de (740 km/h) que lo hacían difícil de ser descubierto por los sistemas, para su gobierno era preprogramado por un autopiloto apoyado en giróscopos verticales y direccionales junto con los datos de los sensores de altimetría y anemómetros barométricos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

El modelo más avanzado, el CL-289, contaba con un fuselaje ampliado (0.38 m. de diámetro, envergadura alar de 1.32 m. y un peso máximo de 240 kg.) y llegaba a un radio operativo de 200 km. Estaba equipado con un transmisor de video el cual enviaba imágenes en tiempo real a la estación terrestre, estando a 70 km de la base.

Para el año 2000 se les incorporo un sistema de navegación más preciso basado en GPS, lo que le permitió volar siguiendo más de cerca el terreno y un radar de apertura sintética para operaciones en cualquier condición meteorológica (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

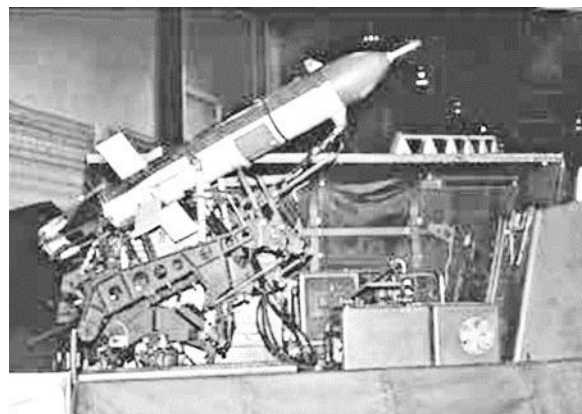


Figura 21. En la izquierda el Canadair CL-89, en la derecha el CL-289.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"El Canadair CL-227 Sentinel adoptó un arreglo axilsimétrico, similar al tipo Westland. Los primeros equipos llevaban dispositivos de video estabilizados, los cuales fueron reemplazados por cámaras de TV. En los equipos avanzados, se sustituyó el motor alternativo Wankel por un turbosojeto Williams."

"En la década de los 80, la Fase III incorporó sensores infrarrojos. Los posteriores avances de Canadair incluyeron dos diseños: el CL-327 Tutor, que utilizó un arreglo axilsimétrico, y el CL-427, que presentó una representación más refinada. Ambos tenían un peso considerable (máximo de 350 kg), hélices de gran tamaño y motores más potentes que la variante Sentinel, con el objetivo de aumentar su eficiencia e independencia en operaciones marítimas. Tuvieron éxito en lanzamientos y recuperaciones desde la cubierta de buques, pero su desarrollo se detuvo en 1999" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 22. En la izquierda el Canadair CL-227 Sentinel, en la derecha el CL-427 Sentinel.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"En la década de los 80, la Fase III incorporó sensores infrarrojos. Los posteriores avances de Canadair incluyeron dos diseños: el CL-327 Tutor, que utilizó un arreglo axilsimétrico, y el CL-427, que presentó una representación más refinada. Ambos tenían un peso considerable (máximo de 350 kg), hélices de gran tamaño y motores más potentes que la variante Sentinel, con el objetivo de aumentar su eficiencia e independencia en operaciones marítimas. Tuvieron éxito en lanzamientos y recuperaciones desde la cubierta de buques, pero su desarrollo se detuvo en 1999" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 23. Del lado izquierdo el modelo IAI Scout y del lado derecho el modelo IAI Pioneer.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"Estos equipos utilizaban un sistema de pilotaje y control giroestabilizador en tres ejes respaldado por un Sistema Autónomo de Control de Vuelo (AFCS) automatizado, así como una doble frecuencia de conexión segura. Del mismo modo, el avance en las capacidades de carga útil con sensores mejorados ampliaba las posibles aplicaciones, incluyendo avances en electrónica, designación láser, comunicación y otros, además de las cámaras infrarrojas. La precisión en la navegación y el perfilado permitía un desembarco más preciso en sistemas desplegados en tierra, aunque aún se enfrentaban dificultades en el rescate de equipos de ala fija en buques" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

1.15 Los 90. El desarrollo de las grandes plataformas

"La implementación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y las comunicaciones satelitales permitieron que los Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS) pudieran operar más allá del alcance de las señales de radio utilizadas anteriormente, mejorando así el sistema de navegación basado en giróscopos y datos del aire

. Gracias a esto, junto con el uso de Sistemas Digitales de Control de Vuelo (DFCS), se logró una mayor precisión y alcance en la navegación, lo que llevó al desarrollo de sistemas de medio y largo alcance. Los primeros sistemas desarrollados incluyeron el Seeker de Denel, mientras que los más recientes incluyen el Gnat de General Atomics" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

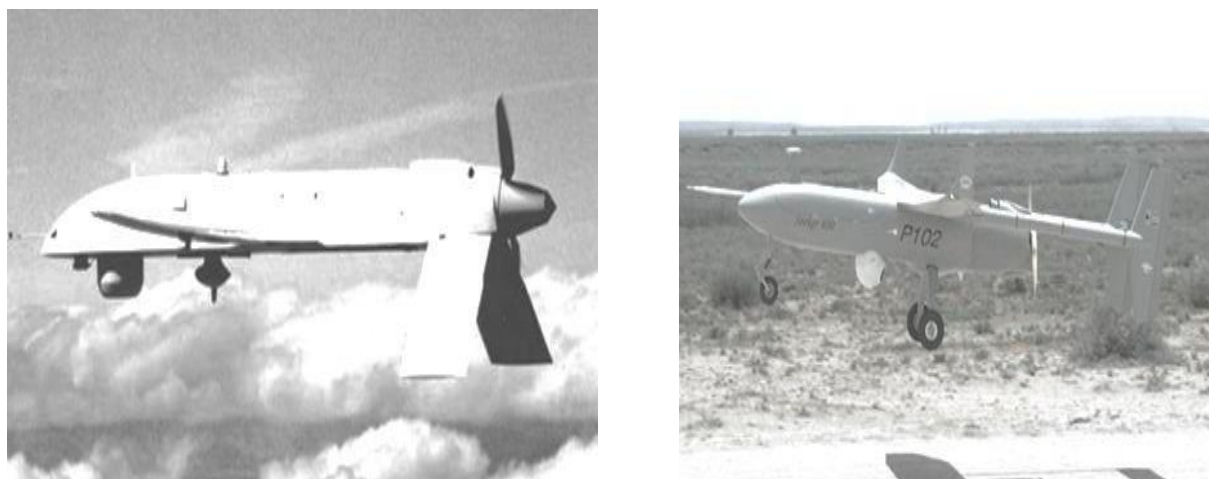


Figura 24. Del lado izquierdo el modelo Gnat Atomics Gnat A y del lado derecho el modelo Denel Seeker II.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"El Gnat, equipado con un motor alternativo, se considera el precursor de los actuales sistemas de media altitud/gran autonomía (Medium Altitude Long Endurance; MALE) y alta altitud/gran autonomía (High Altitude Long Endurance; HALE). Los trabajos con el Gnat comenzaron en la década de 1990 en las regiones de Bosnia y Croacia, inicialmente para tareas de reconocimiento con sensores EO/IR (visible e infrarrojo), y más tarde se adaptaron para incluir dispositivos SIGINT en varias versiones, como A, B y C. Los ensayos realizados con este equipo, conocido como GNAT, allanaron el camino para el desarrollo del MALE UAS Predator a finales de esa década y del HALE Global Hawk de Northrop en la década siguiente.

"Los trabajos con el Gnat y los primeros modelos del Predator permitieron realizar pruebas de inspección a gran altitud, lo que en el pasado proporcionaba defensa contra posibles ataques enemigos. Sin embargo, los sensores EO/IR de detección operaban a baja altitud, lo que los obligaba a descender y los hacía vulnerables a los ataques. Para abordar este problema, se implementaron radares de apertura sintética (SAR).

Durante esos años, Japón comenzó a fabricar en masa sistemas VTOL (Vertical Take-Off and Landing; despegue y aterrizaje vertical), incluyendo el Yamaha R50 y su versión más grande, el R. Max. Estos sistemas se utilizaron inicialmente en la agricultura para el cultivo de arroz y la fumigación, y tuvieron un gran éxito tanto en sus aplicaciones como en la asistencia a los agricultores. Esto llevó a la producción de 1500 sistemas en esa época" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 25. Modelos más relevantes en los años 90. Arriba en la izquierda el UAS VTOL Yamaha RMAX, a la derecha el Zephyr, abajo en la izquierda el Herti y del lado derecho el Global Hawk. *Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid*

1.16 La década de los 2000. Entrando al siglo XXI

"Con la implementación de radares de apertura sintética SAR, los sistemas ganaron la capacidad de operar en trayectos más largos y mayor libertad en comparación con las plataformas existentes. Esto condujo al desarrollo del sistema Predator B, equipado con un motor turbohélice, y el modelo de mayor altitud, el Global Hawk, con un motor turbofán" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

"En esos años, el uso de estos sistemas en contextos militares se incrementó notablemente, con sistemas como el General Atomics Predator, el Northrop Global Hawk y el Scan Eagle de Boeing/InSitu,

que tenían la capacidad de realizar misiones de larga duración, a diferencia de los sistemas de décadas anteriores. En el ámbito civil, que es inherentemente más diverso que el militar, aún existen desafíos para garantizar la separación segura entre aeronaves tripuladas y drones" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

"En esta década, en función de las investigaciones previas sobre cargas de reconocimiento militar, se determinó que era fundamental equipar a las aeronaves con armamento para poder responder a las agresiones de las fuerzas enemigas. Esto también era crucial para apoyar las misiones, ya que antes de la aparición de los UAV, las fuerzas enemigas podían moverse a posiciones más seguras y evitar ser atacadas.

Así fue como se desarrolló el modelo posterior al Predator B, conocido como 'Reaper', una versión más grande y equipada con armamento. Los modelos más avanzados de UAS son las versiones Predator C, similares al Global Hawk, que ya cuentan con capacidad de indetectabilidad al radar (tecnología 'stealth')" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 29).

A continuación, se presenta una tabla que muestra tres etapas del desarrollo de los Predators, desde la versión A de 1994 hasta la última versión C. Esta última versión incluye los sensores de búsqueda de las versiones anteriores y ofrece mayor velocidad y capacidad de vuelo a altitudes más elevadas, clasificándola como de tipo HALE (High Altitude Long Endurance). Además, puede llevar su armamento de forma interna para mantenerse indetectable a simple vista del enemigo."

PREDATOR	A	B	C
Envergadura (m)	18.83	20	20
Longitud (m)	8.13	10.6	13.1
MTOW (kg)	1.020	4.526	7.257
Tipo Motor	Alternativo	Turbohélice	Turbofán
Potencia/Empuje	78.3 kW	500 kW	18 kN
Velocidad máxima (km/h)	217	440	740
Autonomía (h)	>20	32	20
Techo (m)	7.920	12.000	20.000
Carga de pago (kg)	204	385 int./1.360 ext.	1.855 (max)
Tipo de carga de pago	EO/IR SAR,SIGINT	EO/IR TV SAR,Armas	EO/IR, TV, SAR Armas (ext. e int.)

Tabla 2. Etapas y características del modelo Predator.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid



Figura 26. Evolución de los diferentes modelos del UAS Predator. Arriba a la izquierda Predator A, seguido Predator B al final Predator C.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

"La NASA propuso adquirir Global Hawks para llevar a cabo campañas de estudio y análisis de las capas altas de la atmósfera en todo el mundo, junto con la recopilación de datos para su uso en la predicción del clima. En ese momento, se intentaba avanzar con el modelo UAS Zephyr, que demostró la capacidad de realizar vuelos a gran altitud de manera autónoma. El objetivo futuro de este programa era extender los tiempos de operación y aumentar la altitud de los sistemas.

La NASA y Qinetiq buscaban lograr vuelos continuos de hasta 180 días, durante los cuales solo descenderían para tareas de mantenimiento. Además, se trabajaba en incrementar la capacidad de carga útil para transportar equipos de muestreo atmosférico. Otros avances significativos realizados en esos años se centraron en aumentar la automatización para reducir la carga de trabajo y los errores humanos en tierra, así como en ampliar el ancho de banda de radio utilizado para monitorear y transmitir información. En este contexto, se desarrolló el BAE Systems sobre el UAS Herti" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

"El equipo mencionado lograba una autonomía de un día gracias a la combinación de un motor de bajo consumo de combustible y la necesidad de baja velocidad con baja potencia debido al uso de alas de baja resistencia aerodinámica y alta envergadura, tomadas de un planeador. Gracias a los requisitos de rendimiento adecuados, este UAV pudo superar con creces los 6 km de altitud. Su relación peso/carga alar era muy baja (0.39 kN/m), en contraste con los 3.23 kN/m del Global Hawk y un costo considerablemente bajo de 0.018 kN/m en el caso del Zephyr.

El UAS Herti proporcionaba una gran capacidad de carga útil de 150 kg, lo que le permitía transportar el equipo necesario para llevar a cabo evaluaciones de situaciones de forma autónoma. En el futuro, se consideró como un producto para vigilancia constante a baja velocidad.

Los sistemas de despegue/aterrizaje vertical (Vertical Take-Off and Landing; VTOL) continuaron fabricándose en estos años debido a las ventajas que ofrecen sobre los sistemas de ala fija. Estos sistemas se utilizan en situaciones de vigilancia e identificación debido a sus ventajas y simplicidad tanto en el despegue como en el aterrizaje, lo que los hace más seguros en sus operaciones.

Las estadísticas de operación de UAV de despegue/aterrizaje horizontal (Horizontal Take-Off and Landing; HTOL) mostraron que, entre julio de 1991 y diciembre de 2001, aproximadamente el 40% de los incidentes con daños significativos o totales en una flota de UAS Global Hawk, Hunter, Pioneer, Predator y Shadow se produjeron durante el despegue y/o el aterrizaje.

"Durante ese período, las Fuerzas Armadas de Arabia Saudita adquirieron 100 unidades del modelo alemán Schiebel Camcopter S-100, además de otros modelos de UAS VTOL. Mientras tanto, en otros países, se continuaba desarrollando aeronaves, como el modelo chino BUAA M-22, que utilizaba un diseño axilsimétrico" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

En esa misma época, se fabricó el Boeing/Insitu Scan Eagle. Este equipo tenía un diseño de cola en forma de V y se lanzaba utilizando una catapulta, mientras que para su recuperación se utilizaba un garfio que se enganchaba a una cuerda suspendida de una vara. Este método permitió recuperar más de 100,000 dispositivos con éxito y ayudó a abordar el desafío de recuperación que enfrentaban los UAS HTOL. Sin embargo, esta metodología de rescate solo se aplicaba a UAS ligeros. La Marina de los Estados Unidos experimentó con éxito este sistema y continuó desarrollando aeronaves VTOL, como el UAS Northrop Grumman-FireScout, para su uso generalizado" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).



Figura 27. Los modelos de los sistemas desarrollados en esos años, a izquierda el UAS VTOL Schiebel Camcopter S-100 y a la derecha el Scan Eagle de Boeing/InSitu.

Fuente: Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la comunidad de Madrid

1.17 Los avances de los sistemas en el año 2010

"Los sistemas militares de RPAS han mantenido una directriz efectiva desde el final de la Guerra Fría en 1990, y se espera que continúen su crecimiento en los primeros años del siglo XXI. Este avance ha sido impulsado tanto por los desafíos enfrentados por los Estados Unidos como por el desarrollo de su tecnología militar, que ha avanzado significativamente en la automatización.

La tendencia en el mercado de la robótica está en constante aumento, gracias a la capacidad de microprocesadores cada vez más asequibles para llevar a cabo tareas complejas. El principal desafío para el avance de esta tecnología parece residir en el costo de desarrollar software y tecnología eficientes en su conjunto" (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015).

"En el futuro, se espera que el desarrollo de nuevos sistemas se base en los siguientes aspectos:

- Desarrollo de nuevas tecnologías: esto incluye la investigación de nuevos materiales, configuraciones biomiméticas, operaciones completamente autónomas y sensores más sofisticados (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 32).
- Nuevas aplicaciones: los sistemas evolucionarán para llevar a cabo actividades nunca antes realizadas por aeronaves, como el transporte aéreo de carga, el transporte de pasajeros, y actividades de vigilancia y seguridad (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 32).
- Nuevos desafíos: el desarrollo de la aviación no tripulada y las aeronaves no tripuladas implica la necesidad de garantizar una mayor fiabilidad y establecer un marco regulatorio. La fiabilidad de los UAV es de vital importancia, especialmente debido a su creciente uso en el espacio aéreo civil. Por lo tanto, es necesario regular su uso e implementación en este ámbito (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015, p. 32)."

1.18 Tipos de UAVS

Un Vehículo Aéreo No Tripulado, conocido como UAV por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle), es una aeronave robótica con motor que se controla de forma remota por un operador en tierra. Los tipos y usos de estos dispositivos son muy variados, y van desde aplicaciones en publicidad, cine documental, eventos, seguridad y vigilancia de fronteras hasta monitoreo, mantenimiento de redes eléctricas, topografía, geodesia, agronomía, minería, catastros, control de obra, sistemas de información geográfica y cartografía. En la actualidad, se han desarrollado varios tipos de drones, que se clasifican según su tamaño, su función o utilidad, así como su arquitectura. En nuestro objeto de estudio, nos centraremos en dos tipos principales: Multirrotor y Ala Fija. Cada uno de estos sistemas tiene características distintivas que los hacen adecuados para diferentes tipos de

trabajos. Es importante comprender estas características para tomar la mejor decisión en función de las necesidades específicas de nuestro trabajo (Umiles Group, 2022).

"Estos sistemas, conocidos como drones, están equipados con un sistema de posicionamiento integrado, sensores y cámaras de tecnología avanzada que permiten obtener videos y fotos de alta definición" (Umiles Group, 2022, p. 1).

"Los drones multirotor son UAV propulsados por rotores y hélices (cuadricópteros, hexacópteros u octocópteros). A continuación, mencionamos algunas de sus características, así como ventajas y desventajas de su uso" (Umiles Group, 2022).

Ventajas:

- Acceso a zonas de difícil acceso.
- Despegue y aterrizaje vertical sencillos.
- Capacidad de mantenerse en vuelo estacionario.

Desventajas:

- Tiempo de vuelo limitado (aproximadamente 25 a 35 minutos debido al uso de baterías).
- Operación ruidosa de los motores.
- Diseño no aerodinámico.

Limitado a condiciones climáticas favorables; no puede operar en lluvia o con vientos fuertes.

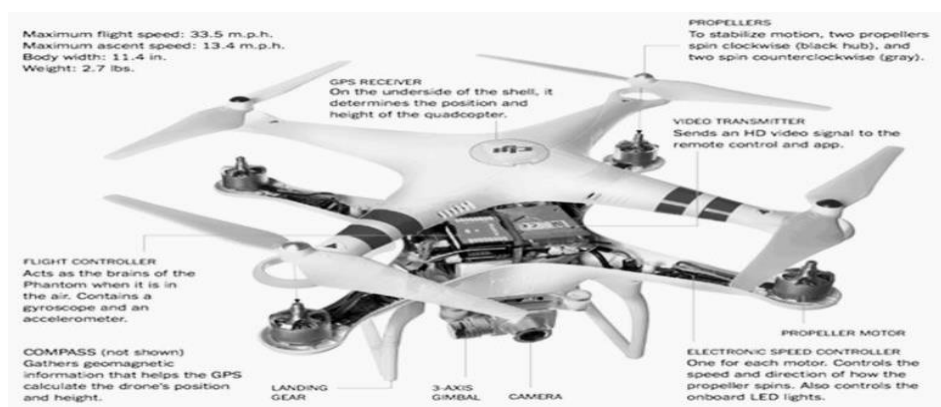


Figura 28. VANT DJ Phantom 2 V2. Multirotor.

Fuente: Umiles.

Los UAV de Ala Fija son adecuados para cubrir áreas extensas debido a su diseño aerodinámico y autonomía, lo que les proporciona mayor eficiencia y velocidad de vuelo. Por esta razón, son ampliamente utilizados en trabajos de cartografía y teledetección. Además, producen menos ruido, lo que les otorga una ventaja en operaciones de vigilancia (Umiles Group, 2022).

El funcionamiento de estos UAV se basa en su diseño estructural, ya que su estructura está unida y no posee un movimiento propio. Generan sustentación mediante los planos, cuyo perfil aerodinámico está diseñado para crear diferencias de presión entre el intradós (parte inferior) y el extradós (parte superior) (Umiles Group, 2022). A continuación, se mencionan algunas de sus ventajas y desventajas, por ejemplo:

Ventajas:

- Cubre áreas extensas de terreno.
- Mantiene la estabilidad en el vuelo debido a su diseño aerodinámico.
- Por su estructura y funcionamiento del motor, es silencioso.
- Realiza el trabajo en un tiempo reducido.
- Tiene un tiempo de vuelo mayor, que varía de 45 a 60 minutos de operación.
- Su estructura es simple gracias a su diseño aerodinámico.

Desventajas:

- Requiere una zona plana para despegar y aterrizar.
- En ocasiones, es necesario utilizar un riel lanzador para el despegue.
- Precisa un despegue asistido por una persona de forma manual.
- No puede mantener un vuelo estático suspendido debido a su diseño.
- Difícilmente puede operar en zonas de difícil acceso.

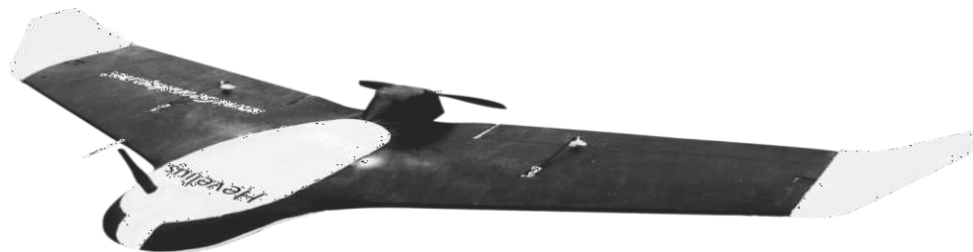


Figura 29. VANT Heveluis. Foto Geon Map.

Fuente: Elaboración propia

1.19 Componentes de un dron

El correcto funcionamiento de un UAV depende de sus mecanismos básicos. Se puede afirmar que la seguridad del UAV se logra gracias a un avanzado sistema de procesos disponibles. Sus componentes principales se mencionan a continuación:

- **Marco o armazón:** Este componente constituye el esqueleto del dron, definiendo su forma y proporcionando la estructura en la que se instalan y aseguran todos los demás componentes y partes. Los tamaños y materiales del marco pueden variar según el modelo (García M. S., 2017, p. 16) (Figura 30).



Figura 30.- Marco o Frame de un dron

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- **Motores, Hélices y ESCs (Electronic Speed Control):** Estos componentes incluyen motores que, junto con las hélices y los controladores de velocidad electrónicos (ESCs), regulan la potencia eléctrica para lograr el giro de los motores con agilidad y eficiencia. Las hélices, al girar a alta velocidad, mantienen en vuelo suspendido al multirrotor (García M. S., 2017, p. 17) (Figura 31).



Figura 31. Motores, hélices y ESCs de un dron

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- Controlador de vuelo: Este componente es el cerebro de la máquina y controla todo lo que sucede con el multirrotor. Es donde se conectan todos los componentes para darle funcionamiento al dron (García M. S., 2017, p. 17) (Figura 32).



Figura 32. Controlador de vuelo de un dron

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- Radio receptor: Este componente es el encargado de recibir la señal de radio que se envía desde el control remoto. Su función es interpretar el movimiento realizado por el usuario y enviar la respuesta en forma de onda radial. La frecuencia es captada por el receptor del multirrotor y convertida en información que se remite al controlador de vuelo para que este genere la instrucción y regule los cambios en la velocidad de los motores (García M. S., 2017, p. 18) (Figura 33).

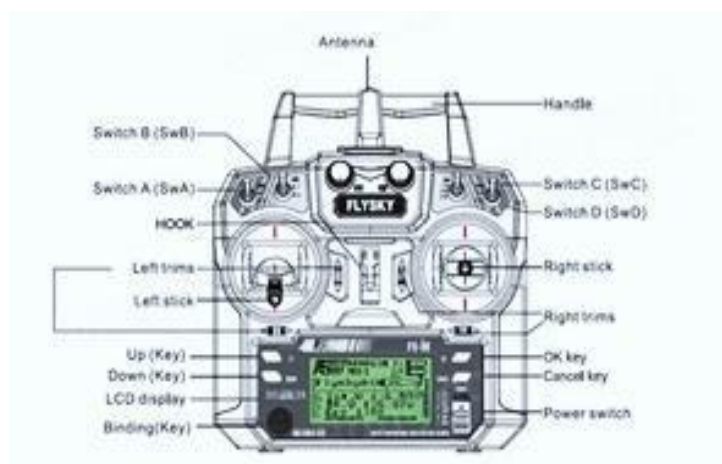


Figura 33.- Radio receptor de un dron.

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- **“Batería:** este componente brinda la energía suficiente para las funciones del equipo, es un componente algo pesado, por lo que los diseños consideran la relación capacidad/peso en los diseños de los drones, para maximizar la autonomía de vuelo del multirrotor” (García M. S., 2017, p. 18). Las que se usan son las de tipo Li-Po (Polímero de Litio) por su consistencia de fuerza, su ligero peso y su mayor tasa de descarga, la cual es idónea en artimañas ágiles como las que utiliza un multirrotor. **(figura 34).**



Figura 34. Batería de un dron.

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- **Cámara y estabilizador:** En el frame o esqueleto se acopla la cámara, que es responsable de capturar fotos o videos durante el vuelo. Dependiendo del tamaño del multirrotor, la cámara puede ser profesional y pesada o liviana, como las de tipo GoPro. Se utiliza un estabilizador para evitar que los movimientos propios del vuelo afecten la calidad de la toma. Estos estabilizadores también ayudan a absorber las vibraciones de los motores y ajustan automáticamente la inclinación de la cámara para que se mantenga en ángulo con respecto al terreno (García M. S., 2017, Figura 35).

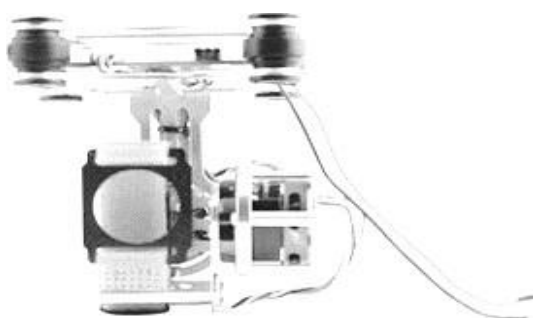


Figura 35. Cámara y estabilizador de un dron.

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- **GPS:** el módulo que incorporan algunos drones permite a los pilotos poder establecer una ruta para poder indicarle al UAV por donde volar, para esto basta con indicar los puntos por donde debe volar el dron, esta operación se realiza dese la emisora de control, basta con pulsar el botón de inicio de vuelo. A este componente se le puede incorporar unas gafas FPV, lo que hace el vuelo más realista (García M. S., 2017) *(figura 36).*

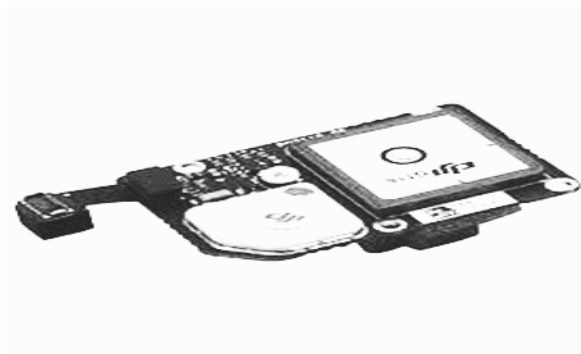


Figura 36. GPS de un dron.

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.

- **IMU:** unidad de medición inercial (inertial measurement unit), este dispositivo electrónico permite medir e informar la velocidad, orientación y fuerza gravitacional del sistema, usando una combinación de acelerómetro y giróscopos (García M. S., 2017, p. 19). Es el dispositivo primordial de los equipos de navegación inercial, lo que logra fijar el punto del equipo, utilizando la metodología conocida como navegación por estima. *(figura 37).*



Figura 37. IMU en un dron.

Fuente: Uso y aplicaciones de drones en minería.



Figura 38. Fotografías de los componentes de un dron DJI PHANTOM.

Fuente: Dronefly

1.20 Usos y aplicaciones en la ingeniería

1.20.1 Aplicaciones cartográficas

“En México El Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota de la Universidad del Mar (Umar), ubicada en el estado de Oaxaca, brinda a los alumnos y especialistas, datos cartográficos útiles para sus investigaciones” (Agencia Informativa Conacyt, 2017).

“Los drones son los equipos principales del laboratorio, gracias a ellos se puede realizar la exploración geográfica, en donde es posible conocer datos como la temperatura, ubicación de zonas en particular para su estudio, así como la obtención de video y fotografía de los sitios de interés (Agencia Informativa Conacyt, 2017).

“Los trabajos de monitoreo del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, pueden apoyar a otras instancias en la toma de decisiones referentes al medio ambiente, como en el caso de la selección de áreas destinadas a la conservación” (Agencia Informativa Conacyt, 2017).

“Los equipos con el que cuenta el Laboratorio emplean drones para el monitoreo de incendios forestales y zonas vulnerables, también se realizan para realizar levantamientos de cartografía de precisión” (Agencia Informativa Conacyt, 2017).

“La cartografía de precisión son mapas de mayor detalle, en los cuales se pueden observar, por ejemplo, índices de vegetación o suelos con capacidad para recarga de acuíferos” (Agencia Informativa Conacyt, 2017).

Además, el Laboratorio de SIG y Percepción Remota comenzaron a efectuar proyectos en combinación con la Comisión Nacional Forestal (Conafor), para llevar a cabo vigilancia de quemas, los dispositivos están provistos con cámaras con visores infrarrojos, con lo que se logra revelar los sitios endebles a quemas, por lo que se han estudiado 66 hectáreas de área y se ha conseguido valorar sitios dañados o susceptibles a quemas.

De acuerdo a (Agencia Informativa Conacyt, 2017) menciona que la cartografía en el sector minero, sobresale hablar de los beneficios que ofrece una instrumento de acopio de información como lo son los UAVs, sus sistemas y sensores con los que son equipados van desde el análisis espectro gráfico, cámaras infrarrojas, interferometría espectral, LIDAR y radares de baja superficie, la cuestión es simple los drones pueden generar que el precio de las tareas disminuyan, de la misma forma los tiempos de cumplimiento, además de ser métodos más seguros, en el sector minero el tema de la seguridad es un factor muy importante por lo que tareas como: estudios en canteras, bordes de acantilados, áreas contaminadas se vuelven más seguras en su ejecución.

Los trabajos más sobresalientes que contribuye el uso de un UAV en la minería son:

- Obtención de fotografía aérea, orto mosaicos y videos.
- Medición volumétrica de reservas e inventarios de materiales.
- Medición de volúmenes y detección de fugas en Presas de Jales y vaciaderos.
- Monitoreo de erosión, movimientos de tierra y estabilidad superficial.
- Superficies actualizadas para diseño de voladuras eficientes.
- Datos previos, durante y posterior a voladuras, análisis de fragmentación.

- Detección térmica de flujos y agua subterránea.
- Modelos de áreas geofísicas y cuencas hidrográficas de captación.
- Diseños de tajos, ruta de carga, vaciaderos y áreas de rehabilitación.
- Gestión de tajos, presas, vaciaderos, aguas y drenaje.
- Control de calidad y planificación de la exploración.
- Supervisión/control de actividades y monitoreo de avances.
- Cartografía térmica
- Análisis multiespectral para mineralogía en áreas de difícil acceso.
- Cartografía de zonas con pendientes pronunciadas e inaccesibles.
- Creación y gestión de planes de ubicación e inventario.
- Vigilancia en tiempo real y seguridad en zonas de difícil acceso.

"La aplicación de UAVs en la digitalización de datos geoespaciales puede resultar en una organización más eficiente de los recursos y procesos en una mina. Esto puede mejorar las técnicas de exploración, el ciclo de producción, la sistematización y las mejoras en los procesos. El uso de drones permite el control de trabajos remotos, lo que favorece el desarrollo de la eficacia en esta industria (Agencia Informativa Conacyt, 2017)."

1.20.2 Aplicaciones de los UAS en las vías terrestres

"Las aplicaciones dentro del campo de la ingeniería son muy interesantes debido a la capacidad técnica de captura y manejo de información que ofrecen los drones. Entre las aplicaciones en las vías terrestres se pueden mencionar las siguientes (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015):"

- Transferencia al instante de datos, selecto en el movimiento de camino vial (accidentes, tramos en reparación, congestión vehicular, accesos bloqueados, obras en proceso, etc.)
- Revisión y seguimiento de elementos en pasos superiores para ver perjuicios.
- Compilación de muestreos de movimiento automotriz.
- Contabilidad de volúmenes de obra y avance de obra.
- Caracterización del área de trabajo en incidentes carreteros (caminos de diésel, químicos peligrosos etc.)
- Exploración de sitios peligrosos con peligro de deslizamientos en sitios montañosos cubiertos de nieve.
- Exploración de sitios con quemas en caminos o sitios abruptos.

“Estas aplicaciones pueden proveer datos de gran aporte a los sistemas de información geográfica, permiten que se puedan tomar acciones correspondientes en base a la disposición de la información base” (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2015)

El camino para compilar se ejecuta de la siguiente forma:

- El UAV compila datos de un sitio en específico.
- Acumula y comunica los datos en tiempo real al ejecutor.
- Obtenidos los datos se retransmiten a una computadora, la cual está conectada con la señal de una vía (SIAT), además logra formar una base de datos, de la averiguación recogida para nutrir un SIG.
- Con los datos recibidos, el especialista del computador descifra los datos, remite mensajes a los usufructuarios, los cuales pueden ser desde un cambio de sincronización de los semáforos, hasta las situaciones de tráfico en una vía.
- Con los datos transmitidos, el usuario puede tomar las mejores decisiones, respecto al tiempo, seguridad e información de tráfico en la vía.

"Con estos puntos se logra conseguir un control total del tráfico. Desde el año 2013, la empresa checa ha estado trabajando en este tipo de estudios y señala que un UAV situado en algún punto del tráfico puede proporcionar datos selectos para quienes toman decisiones sobre los movimientos en las urbes.

La empresa ha desarrollado un algoritmo basado en redes neuronales que tiene la capacidad de identificar qué automóvil transita en la ruta y asignarle un "ID" único. Otros datos que proporciona son la velocidad y el recorrido. El sistema puede implementarse con cámaras fijas sin la necesidad de utilizar un UAV, pero la calidad de las fotografías tomadas por el UAV es excelente y proporciona datos más precisos, lo que resulta en mayores beneficios."

1.20.3 Aplicaciones de los UAS en catastro

"Los estudios de los UAVs en el ámbito público se están convirtiendo en una técnica integral de recopilación de datos. En la jurisdicción de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, esta decisión se ha materializado, y con ella es posible crear cartografía digital basada en imágenes aéreas a diferentes escalas para su uso en la administración pública" (Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, 2017).

"Con estas herramientas es posible vectorizar información capturada mediante imágenes de gran precisión, lo que sirve para actualizar la base de datos catastrales del municipio" (Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, 2017, p. 1).

"En el año 2017, el gobierno municipal de Tlajomulco fue reconocido por su innovación en el sector público, en el marco del concurso Innovation Week organizado por la revista Innovation Magazine" (Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, 2017, p. 1).

- "Se logra efectuar la recaudación real de los m2 de propiedad y edificación que posee cada habitante, así como las compañías, con el objetivo de renovar las cobranzas del gravamen predial y con esto optimizar el cobro.
- Estudiar en tiempo real el uso de suelo. Esta información se determina si puede procederse o no a la obtención de una licencia.
- Poder reconocer los negocios y giros existentes en el distrito y la investigación sobre si cuenta con licencia municipal.

"Con la integración de la cartografía en el catastro, facilita poder realizar la gestión de información de las propiedades, así como si se encuentran al corriente en sus contribuciones y demás trámites" (Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, 2017, p.1).

1.20.4 Aplicaciones de los drones en la arqueología

"También tiene sus aplicaciones en la arqueología. El estado de Sinaloa se pone a la vanguardia de las investigaciones arqueológicas al emplear el dron Bitachi I, el cual ha volado sobre los sitios prehispánicos de Las Labradas y Cerro de la Máscara" (Gobierno de México, 2015, p.1).

El UAV está provisto con un dispositivo de alta definición que logra examinar con fidelidad los lugares prehispánicos que tienen sitios de petroglifos y ubicar sitios donde hubo instalaciones humanas. Fue el Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS) y su laboratorio AntropoSIG los que cooperaron para componer un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Las Labradas y expresarse con un mapa justo del antiguo Cerro de la Máscara. Esto sirve como recurso competente y jurídico para sembrar la declaratoria federativa de este lugar como sitio de monolitos antiguos (Gobierno de México, 2015).

Las tareas con UAV se efectúan en la Loma de la Careta, que se localiza al norte de Sinaloa, en el municipio de El Fuerte, con el objetivo de fabricar un polígono de salvación y así mismo obtener una descripción geográfica del lugar, conjuntamente el material 3D del sitio de los Petrograbados y la

localización de los establecimientos humanos. Los frutos del uso de los UAV han conseguido adquirir datos geoespaciales de lugares de difícil dirección que simbolizan la propiedad.

"En la década de los 80, el Dr. Jaime Litvak fue un predecesor de este tipo de estudios en México. Experimentó la obtención de imágenes a través de cámaras acopladas en aeroplanos dirigidos de forma remota. A principios del siglo XXI, las imágenes por satélite y el internet revolucionaron los conocimientos. En la actualidad, el uso de UAVs está haciendo más fácil su uso en lugares como la arqueología, al mismo tiempo que desarrolla posibilidades inconcebibles en el campo de estudios a nivel global" (Gobierno de México, 2015).

1.20.5 Aplicaciones de los drones en la agricultura de precisión

"El estudio de la ciencia en el progreso del campo también está tomando fuerza, ya que su implementación consigue ampliar los horizontes de la producción.

'La 'Agricultura de Precisión' contribuye específicamente a optimizar el uso de los recursos e insumos al utilizarlos de forma adecuada en el lugar y momento preciso, para maximizar la producción' (InfoAgro, 2019, p. 1).

Desde la década de los 80, el término 'agricultura de precisión' se ha utilizado para describir el uso de tecnología en las zonas rurales más avanzadas. En México, estados como Guanajuato, Sinaloa y Jalisco están adoptando estas innovaciones para determinar con precisión la cantidad óptima de cultivos, evaluar el uso adecuado de fertilizantes y la siembra. Estas son algunas de las posibilidades que ofrece el uso de la tecnología (InfoAgro, 2019).

Este avance tecnológico involucra varias tecnologías, incluyendo los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). La combinación de GIS con GPS permite obtener datos en tiempo real, lo cual es fundamental para el análisis y la gestión eficiente de la información geoespacial. Esto posibilita la planificación de cultivos, el muestreo de suelos, la orientación de las rutas de los tractores, la exploración de campos y la creación de mapas topográficos y de rendimiento.

Estas técnicas permiten establecer relaciones entre la producción y las características del terreno, lo que facilita el desarrollo de estrategias más eficaces para maximizar la producción de suelos y cultivos (InfoAgro, 2019)."

"Estos trabajos se optimizan con imágenes satelitales para que los agricultores puedan tomar decisiones informadas al procesar los datos de campo y vincularlos con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para gestionar y controlar los recursos agrícolas. El sistema GPS también se ha incorporado en estas labores, adaptándolo a los tractores convencionales, lo que permite su control desde una tablet a través de WiFi y el envío de información mediante sensores láser. Además, se utilizan cámaras digitales con tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging), las cuales, a través de sus sensores láser, pueden recopilar información sobre la salud de los cultivos" (InfoAgro, 2019).

Entre los beneficios del equipamiento a los tractores podemos mencionar:

- Reducen al área de traslape en el terreno
- Maximizan la eficiencia en la ejecución de los trabajos.
- Posibilitan el trabajo en condiciones de visibilidad reducida.
- Ayudan a gestionar los recorridos de los equipos.
- Aumentan la producción al reducir la compactación del terreno"

"Los drones también son empleados para la aplicación de agroquímicos de manera precisa en zonas extensas de terreno. Otra función es que, con la implementación de una cámara multiespectral con el modelo de color RGB y sensores térmicos, pueden capturar imágenes para determinar las áreas con baja densidad de cultivo, así como las áreas con malas hierbas. Además, miden la temperatura del cultivo, el índice de clorofila y hasta las deficiencias en nutrientes. En Japón, la compañía Yamaha ha logrado incorporar 2500 drones en la agricultura de precisión, lo cual ha beneficiado a más de 7000 agricultores, según datos publicados por la red de especialistas en agricultura. Esto ha demostrado que los métodos tradicionales no son tan eficientes en comparación con los métodos innovadores de aplicación de tecnología (InfoAgro, 2019)."

En resumen, la implementación de drones en la agricultura conlleva a:

- Utilizar eficientemente los recursos.
- Identificar y cuantificar las zonas problemáticas.
- Detectar oportunamente problemas de estrés hídrico, nutricional, plagas y/o enfermedades.
- Obtener información confiable en poco tiempo.
- Mantener bajos costos por hectárea.
- Aumentar la seguridad de los trabajos al emplear herramientas tecnológicas (InfoAgro, 2019)."

1.20.6 Aplicaciones topográficas

"Los avances tecnológicos han contribuido al desarrollo de la topografía, un ejemplo es el trabajo realizado por personal del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en playa El Palmar, ubicada en Ixtapa Zihuatanejo, en el estado de Guerrero. El equipo utilizado fue un sistema de posicionamiento global GPS cinemático en tiempo real RTK y un dron (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

"Dicho trabajo puede mostrar la técnica tradicional del levantamiento topográfico, empleando una estación total. Las consideraciones y alcances del proyecto fueron realizadas por personal con experiencia" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023, p. 1).

El área de influencia tiene una distancia promedio de 2,700 m y un ancho promedio de 40 m, sin ningún obstáculo. El trabajo incluyó perfiles transversales de la costa cada 20 m, con puntos a cada 5 m de los límites de los dominios hasta una profundidad de 1.5 m, en referencia al banco de nivel ubicado en la escollera Oeste del acceso a la marina Ixtapa (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

Al teodolito se le acopló un distanciómetro para medir las distancias entre los puntos. Se seleccionó una ubicación óptima para colocar el equipo y hacer más eficientes las labores de campo. El registro se elaboró en una libreta de campo, y el tiempo estimado del trabajo fue de aproximadamente 16 horas, equivalentes a 2 días de trabajo (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

"En el caso de la estación total, se ubicó en un punto estratégico para maximizar las labores de campo, y el tiempo requerido para los trabajos fue de 1 día y $\frac{1}{2}$, aproximadamente 12 horas de trabajo" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023, p. 1).

En el caso del sistema GPS con RTK, se emplea tecnología de navegación satelital, junto con un módem de radio o teléfono GSM para obtener correcciones de posición en tiempo real. Para comenzar, se coloca la base en un punto de control con coordenadas x, y, z conocidas. Para aumentar la precisión, se realizan observaciones en modo estático durante un tiempo largo, de hasta 6 horas, para proporcionar una precisión adecuada al punto de control de referencia. Luego, se realiza un proceso posterior para hacer una conexión con las estaciones de control de la red geodésica del Inegi, lo que permite llevar a cabo el levantamiento topográfico (Instituto Mexicano del Transporte, 2023)."

"Con esto, el equipo va almacenando la información en la memoria interna del equipo Rover. Una vez terminado el trabajo, se descarga la información en una computadora. El tiempo empleado para la toma de datos fue de aproximadamente 8 horas. Esta técnica presenta ventajas frente a los

anteriores métodos, debido al ahorro de tiempo en el registro de los puntos y el traslado del equipo Rover para la toma de datos (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

El empleo de drones en los levantamientos topográficos implica la toma de fotografías aéreas georreferenciadas. El área de cobertura estándar de un equipo es de hasta 100 hectáreas en un día, dependiendo del equipo y de las baterías, se pueden cubrir hasta 5000 hectáreas en un día.

Los datos recolectados son procesados mediante un software especializado para obtener modelos 3D con resolución centimétrica y precisiones de hasta 1 cm. Se pueden destacar las ventajas del empleo de esta técnica en la siguiente lista:"

- **Mayor cobertura**, algunos puntos son de difícil acceso para los ayudantes, sin embargo, un dron puede obtener información del sitio.
- **La cantidad de información** que un dron captura es mayor a la que en los métodos tradicionales se puede obtener y en menor tiempo, con lo que las nubes de puntos tienen una alta resolución y muestran una representación más fiel del terreno.
- **Por otro lado**, la seguridad es otro factor de importancia, ya que la operación del equipo es totalmente autónoma.

"Otro factor importante para aumentar la exactitud de este método es la implementación de puntos de control. En este trabajo se emplearon 8 a lo largo de la playa, y la duración del trabajo en campo fue de aproximadamente 4 horas. Los resultados obtenidos incluyen la obtención de un modelo de elevación digital y una ortofoto georreferenciada" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

"Con lo anterior, se puede concluir que los trabajos topográficos de alta calidad requieren la combinación de técnicas con GPS RTK y drones para lograr los resultados deseados. Entre sus beneficios se incluyen la rapidez con la que se pueden cubrir áreas extensas y zonas de difícil acceso, la cantidad de puntos que se obtienen en los levantamientos, lo que permite realizar modelos digitales de elevaciones (MDE)" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

"Algunos problemas en el empleo de drones incluyen la imposibilidad de realizar topografía en cuerpos de agua, la necesidad de contar con puntos de control para rectificar las imágenes aéreas, la obtención de permisos en áreas de vuelo restringido y la dependencia de condiciones climáticas favorables para la realización de vuelos" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

"La combinación de tecnologías como el GPS cinemático en tiempo real y los drones ha revolucionado la forma en que se realizan los trabajos topográficos, permitiendo una mayor rapidez, precisión y cobertura en la captura de datos geoespaciales" (Instituto Mexicano del Transporte, 2023).

1.21 Normativa Vigente en México

Conforme a lo establecido por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), tanto como los fabricantes de aeronaves y la autoridad aeronáutica, deberán de asegurar la aplicación de los estándares para prevenir accidentes, así mismo en la operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) debe de considerar minimizar el riesgo de daño a personas o propiedades durante su recorrido.

Actualmente en México existe una norma sobre el uso de RPAS, emitida por la Dirección General de Aeronáutica Civil de la SCT, dicha norma incluye los lineamientos para pilotar los UAV, cualquier incumplimiento de esta norma, produce una sanción de carácter civil, por lo que es prioridad que los dueños de los drones, realicen un registro en línea de su dispositivo.

Es necesario que el operador tenga una licencia para poder volar drones, a partir del 2018, este requisito se volvió necesario y en 2019 se implementó el proceso de regularización, para que por medio de estos estatutos se mantenga el buen uso de los drones, se implemente el uso de las licencias y asignar multas para quienes operen incumpliendo lo establecido en la norma (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

La publicación de esta normativa en el Diario Oficial de la Federación (DOF) detalla la normativa aplicable. La multa económica por incumplimiento ronda los \$403,000.00 pesos. Esta sanción se establece debido a que el uso de drones fuera de los estatutos de la norma podría ocasionar colisiones con otras aeronaves tripuladas, poniendo en riesgo la vida de los tripulantes y ocasionando daños colaterales (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) estipula que la responsabilidad de los pilotos de drones es de igual relevancia que la de cualquier otro piloto, ya que en ambos casos las aeronaves ocupan el mismo espacio aéreo. Esto se debe a que el empleo de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) puede poner en riesgo a aeronaves comerciales o de pasajeros. La intención es lograr un "mapeo" que permita ubicar las zonas seguras para volar RPAS (Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia) y aquellas en las que se pueda comprometer la seguridad de otras aeronaves, considerando la altitud máxima de los vuelos sin salir del rango de operación del dispositivo (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la DGAC, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para registrar y volar un RPAS (Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia) en México:

Clasificaciones:

1. RPAS micro (2 kg o menos).
2. RPAS pequeño (de 2 kg hasta 25 kg).
3. RPAS grande (25 kg o más).

Requisitos para Obtener una Licencia de Piloto de un RPAS grande:

- Presentar una solicitud por escrito.
- Ser mayor de edad o tener al menos 18 años cumplidos.
- Proporcionar un acta de nacimiento o documentación que acredite la nacionalidad mexicana.
- Completar el formato de cédula de registro proporcionado por la Aeronáutica Civil.
- Presentar un comprobante de pago de derechos por permiso de formación, aplicación de examen y expedición de licencia.
- Proporcionar documentación que acredite haber presentado y aprobado los exámenes prácticos y teóricos establecidos por la autoridad aeronáutica.
- Contar con un certificado expedido por un centro de instrucción reconocido por la autoridad aeronáutica.
- Presentar una constancia de aptitud psicofísica vigente con una validez de 90 días a partir de la fecha de expedición, emitida por la Dirección General de Protección y Medicina Preventiva del Transporte.
- La licencia tiene una vigencia de 3 años a partir de su expedición y puede ser cancelada por la autoridad aeronáutica en caso de operación irresponsable, uso con fines delictivos o a petición del interesado (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

En el caso del registro de RPAS (Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia) "pequeños" y "micro", este proceso se realiza de manera gratuita y tiene una duración estimada de 10 días. Aunque no se requiere una licencia para estos RPAS, es obligatorio registrarlos en línea.

A continuación, se detallan los pasos para el registro de RPAS "pequeños" y "micro":

Deberá registrarse ante la Dirección General de Aeronáutica Civil antes de ponerlo en operación. Para realizar el registro, se requiere ser de nacionalidad mexicana y ser mayor de edad. En caso de ser menor de edad, el padre o tutor deberá llevar a cabo el registro en su nombre y completar el formulario correspondiente.

Una vez completado el formulario de registro, este debe ser enviado, especificando una de las dos opciones: registro de RPAS comercializados en México o registro de RPAS por propietarios, según corresponda.

Si el solicitante es una persona física, deberá acreditar su identidad adjuntando una copia digitalizada de su INE u otra identificación oficial.

En el caso de personas morales, se debe acreditar la personalidad adjuntando una copia digitalizada del acta constitutiva (el registro legal de la creación de la empresa) y un poder notarial del representante legal.

Se debe contar con una copia digitalizada de la documentación que acredite la propiedad o posesión del RPAS en uno de los siguientes formatos admitidos: .pdf, .docx, .jpg o .png.

Una vez que se haya completado el formulario y se cuente con toda la documentación requerida, se debe enviar un correo electrónico a la dirección rpas@sct.gob.mx solicitando el registro para un RPAS. Se debe adjuntar el formulario completo en Excel, firmado por el interesado, junto con el RFC con homoclave y las copias digitalizadas de la documentación que acredite la propiedad o posesión del RPAS.

Después de enviar la información, se debe esperar a recibir el folio de registro o las consideraciones adicionales que puedan ser necesarias para completar el proceso. Toda esta información será enviada al correo electrónico proporcionado durante el registro (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

El 18 de agosto de 2018, se publicó en El Diario Oficial de la Federación un decreto que reformó y adicionó disposiciones a la ley de aviación civil y a la ley de aeropuertos. Estas modificaciones incluyeron la inclusión de las aeronaves no tripuladas (UAV) dentro de las leyes que regulan su correcto uso, sus regulaciones y sus alcances.

Sin embargo, a medida que se produce la transición de gobiernos y se lleva a cabo la reestructuración en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se prevén futuras modificaciones. Estas revisiones buscan mejorar y ampliar las normativas relacionadas con los drones (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

La Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA) ha desarrollado un reglamento modelo compuesto por 11 partes, con el objetivo de establecer un orden y un control en el manejo y la aplicación de la tecnología de drones.

Estas partes incluyen:

1. Políticas, procedimientos y definiciones generales.
2. Otorgamiento de licencias al personal.
3. Organizaciones de instrucción reconocidas.
4. Matrícula y marcado de las aeronaves.
5. Aeronavegabilidad.
6. Organizaciones de mantenimiento reconocidas.
7. Instrumentos y equipo.
8. Operaciones.
9. Administración y certificación del explotador de servicios aéreos.
10. Transporte aéreo comercial por explotadores de servicios aéreos extranjeros dentro del estado.
11. Trabajos aéreos.

La FAA, como organismo regulador en Estados Unidos, ha propuesto estas normativas y regulaciones en función de la retroalimentación obtenida de diversas instituciones y países asociados. Esto permite la posibilidad de estandarizar las normas en países como México, que aún están en proceso de desarrollo en estos campos debido a la falta de experiencia y de información disponible (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

A continuación, se presenta una lista de requisitos generales vigentes según la FAA en los Estados Unidos, aplicables tanto a vuelos comerciales como recreacionales. Estos requisitos son de interés no solo por su importancia en la operación de drones en ese país, sino también como referencia para países en desarrollo en la aplicación de estas tecnologías (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

Para Vuelos Recreativos:

1. Vuelo por pasatiempo o recreación, sin propósitos comerciales.
2. Registro del UAV con la FAA en el sitio web "faadronezone".
3. Vuelo dentro de la línea de visión del operador.
4. Adherencia a las pautas de seguridad de una organización comunitaria reconocida, como la AMA (Academia de Modelismo Aéreo).
5. Peso del dron de menos de 55 libras (25 kg), a menos que cuente con certificación de una organización comunitaria.
6. Mantener distancia segura de otras aeronaves.
7. Notificación previa al aeropuerto y a la torre de control de tráfico aéreo antes de vuelos a menos de 5 millas del aeropuerto.
8. Evitar volar cerca de zonas de rescate o emergencias.

Para Vuelos Comerciales:

1. Certificado de piloto remoto emitido por la FAA recomendado.
2. Registro del UAV con la FAA en su sitio web recomendado.
3. Peso del UAV al despegar debe ser inferior a 25 kg, incluyendo la carga útil.
4. Vuelo en espacio aéreo Clase G (espacio aéreo no controlado).
5. Mantenimiento de la línea de visión para control.
6. Altitud máxima de vuelo de 120 m o menos.
7. Vuelos durante el día o el crepúsculo civil.
8. Velocidad máxima de vuelo de 160 km/h o menor.
9. Prioridad de paso a aeronaves tripuladas.
10. Evitar vuelos directamente sobre personas.
11. Prohibición de volar desde un vehículo en movimiento, a menos que se encuentre en un área escasamente poblada.

Estos requisitos son fundamentales para garantizar la seguridad y la regulación adecuada de las operaciones con drones en los Estados Unidos y pueden servir como modelo para otros países, incluyendo México (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

Después de una revisión, podemos comprender la gran responsabilidad que implica el uso de drones. Es de vital importancia cumplir con las normativas en todas las actividades relacionadas con estos dispositivos para evitar problemas con las autoridades y cumplir con las legislaciones vigentes. A medida que avanza el tiempo, es probable que esta normativa se modifique y se adapte a medida que

se desarrollen nuevos campos de aplicación. Por lo tanto, es importante estar al tanto de los cambios y ajustarse a las regulaciones actualizadas (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

Como señala la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), la aplicación de estándares para prevenir accidentes y minimizar el riesgo de daño a personas o propiedades durante la operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) es de suma importancia. Tanto los fabricantes de aeronaves como las autoridades aeronáuticas deben priorizar la seguridad en las operaciones de RPAS (Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, 2019).

1.22 Programas de procesamiento de información para UAV

1.22.1 Metashape

El software "Metashape Mapper" es una poderosa herramienta que permite la conversión de miles de imágenes aéreas, ya sean oblicuas u ortogonales, capturadas por UAV ligeros o aeronaves, en ortomosaicos georreferenciados, modelos 3D de superficie y nubes de puntos (DTM Topografía, 2023, p. 1).

Con su avanzada tecnología de triangulación aérea automática basada únicamente en el contenido de la imagen, Metashape convierte la cámara del UAV en una herramienta de medición de alta precisión (DTM Topografía, 2023, p. 1).

Este software se ha establecido como una solución integral para la evaluación, corrección y mejora de proyectos directamente en el software, con la capacidad de importar los resultados a cualquier solución profesional de GIS, CAD o paquete tradicional de software de fotogrametría. El costo de la licencia de Metashape oscila entre 8000 y 8500 dólares estadounidenses (DTM Topografía, 2023, p. 1).

En resumen, Metashape se ha demostrado como una herramienta eficiente y precisa para procesar imágenes aéreas capturadas por UAV, transformándolas en productos geoespaciales. Su tecnología de triangulación aérea automática basada en el contenido de la imagen facilita la generación de ortomosaicos georreferenciados, modelos 3D y nubes de puntos. Además, su integración con otros software profesionales de GIS, CAD y fotogrametría lo convierte en una solución versátil para diversos proyectos (DTM Topografía, 2023, p. 1).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y equipos

2.1.1 Materiales

Los materiales utilizados en campo han sido los siguientes:

- Varillas de fierro de 1/2"
- Cemento
- Arena
- Pintura roja y blanca
- Brocha
- Disolvente
- Banderolas
- Libretas de campo
- Pintura Blanca
- Pintura roja

El uso de materiales adecuados y de calidad es esencial para garantizar la durabilidad y legibilidad de las marcas y señales en el terreno. En este sentido, se emplearon varillas de acero de calibre 1/2", cemento, arena, pintura roja y blanca, brochas, disolvente, banderolas, libretas de campo, así como pintura blanca y roja. Estos elementos fueron fundamentales para la marcación y registro durante el proceso en el campo (Instituto Mexicano del Transporte, 2023, p. 1).

2.1.2 Equipos

En el proyecto de investigación se utilizaron los siguientes equipos y herramientas:

- Cámara fotográfica de 12 megapíxeles.
- Estación total HI TARGET.
- Drone Phantom 3.
- GPS RTK GEOMAX.
- Laptop Lenovo Core i7.

- Impresora Epson 1400 en formato A3.
- Software especializado en el área, conocido como "Metashape".

El software "Metashape" se utilizó para llevar a cabo las tareas de captura, procesamiento y generación de modelos y resultados (DTM Topografía, 2023).

2.2 Método de investigación

2.2.1 Técnica de recolección de datos

En el proceso de investigación, se utilizaron dos métodos de recolección de datos:

1. Método Directo: Se realizó la toma de datos utilizando una estación total, capturando puntos resaltantes que incluían detalles planimétricos, así como formas foto identificables. Este método proporcionó información precisa y detallada (Cheli, 2011, p. 25).
2. Método Indirecto: Se llevaron a cabo tomas fotográficas aéreas como paso inicial. Posteriormente, se digitalizaron estas fotografías utilizando software especializado. Este enfoque permitió obtener una amplia cobertura y una representación tridimensional de la zona de estudio (Cheli, 2011, p. 25).

La combinación de estos dos métodos resultó efectiva en la obtención de datos para la investigación. El método directo proporcionó detalles precisos, mientras que el método indirecto permitió una visión completa y tridimensional de la zona de estudio (Cheli, 2011, p. 26).

En nuestro proyecto, la técnica de procesamiento estadístico y análisis de datos se seleccionó de acuerdo con el nivel de medición y el enfoque de investigación. Para evaluar las diferencias entre los grupos en un diseño experimental completamente al azar, se empleó la prueba "t" de Student emparejada, con dos tratamientos y cuatro repeticiones.

Para la variable Longitudinal, se aplicaron dos métodos de toma de datos:

- Método de Testigo: Se realizó una recolección de datos detallada de puntos resaltantes, similar a un levantamiento topográfico, utilizando una estación total calibrada y probada (Cheli, 2011, p. 30).
- Método de Contraste: Se llevó a cabo un levantamiento indirecto mediante tomas

aéreas utilizando el dron Phantom 3 Professional en las áreas de estudio descritas anteriormente (Cheli, 2011, p. 30).

Para la variable Tiempo, se emplearon los siguientes métodos:

- Método Testigo: Se realizó la toma de datos tridimensionales con una estación total. El procesamiento de estos datos se llevó a cabo calculando manualmente las coordenadas sin utilizar un software específico (Cheli, 2011, p. 30).

La elección de la prueba "t" de Student emparejada se basa en su capacidad para evaluar las diferencias significativas entre grupos de manera precisa y confiable en un diseño experimental completamente al azar. Este enfoque estadístico permitió realizar comparaciones sólidas entre las variables longitudinales y de tiempo en el proyecto de investigación (Cheli, 2011).

2.3 Salida a campo - uso de la aplicación PIX4D Mapper App.

Inicialmente, procedimos a calibrar la brújula según se describe en las páginas anteriores de este informe, informando al dron sobre su posición tanto vertical como horizontal en el punto de inicio. Una vez que el dron mostró luces LED verdes parpadeantes, permaneció en el suelo durante 15 segundos para reconocer la posición de inicio, en caso de que fuera necesario regresar de emergencia (auto go home) (Pix4D, 2023).

Antes de utilizar Pix4Dmapper Captura App, es fundamental aprender a volar el dron de forma manual. El control manual del dron es la única manera de evitar obstáculos o recuperar un dron que se aleja debido a interferencias GPS (Pix4D, 2023).

Para utilizar su dron con el fin de capturar imágenes óptimas para modelos 3D precisos, es necesario seguir estos pasos:

1. Planear la misión.
2. Capturar las imágenes.
3. Sincronizar las imágenes con el dispositivo.



Figura 39. Misión para vuelo fotogramétrico.

Fuente: Elaboración propia

Tamaño de la Cuadrícula: La configuración de la red por defecto (50x50 metros) define un pequeño tramo que funciona en casi todas las condiciones y que se puede completar en unos 5-10 minutos. Al aumentar el tamaño de la cuadrícula, también se incrementa el tiempo de vuelo. Asegúrese de que dispone de suficiente batería si decide aumentar el tamaño de la cuadrícula. La vida útil de la batería depende de varios factores como el viento, la temperatura, la edad de la batería, entre otros (Pix4D, 2023).

Color de la Cuadrícula: La cuadrícula se muestra en verde cuando el tamaño es óptimo para realizar un vuelo con una batería completamente cargada. Si el tamaño de la cuadrícula se vuelve un poco demasiado grande, de modo que la batería podría no ser suficiente para completar toda la misión, la cuadrícula se muestra en amarillo. Si la cuadrícula es demasiado pequeña para garantizar la calidad de los modelos 3D y los mapas, también se muestra en amarillo. Si la cuadrícula es demasiado grande para volar con una batería completamente cargada, se muestra en rojo. En este caso, se recomienda no realizar el vuelo y ajustar el tamaño de la cuadrícula de manera adecuada (Pix4D, 2023).

2.3.1 Inicio de la misión:

Una vez que la misión de la rejilla se ha preparado, se puede iniciar. A continuación, se describen los pasos a seguir:

Coloque el dron en una zona libre de al menos 10 por 10 metros donde pueda obtener una señal GPS de manera confiable.

Encienda el extensor de alcance Wi-Fi del mando a distancia.

Encienda el control remoto (Pix4D, 2023).

Advertencia: ****Encienda el mando a distancia antes de volar. Si no se enciende, no podrá retomar el control manual del dron. El control manual del dron es la única forma de recuperar un dron que se aleja o evitar obstáculos.**

A continuación, realice los siguientes pasos:

1. Encienda el dron.
2. Verifique que pueda iniciar y detener las hélices manualmente.
3. Ajuste el interruptor S1 a la posición superior.
4. En la aplicación, haga clic en "Siguiente".
5. Nota: El dron no despegará en este punto.

Lea atentamente las instrucciones de seguridad que se muestran y haga clic en "Siguiente".

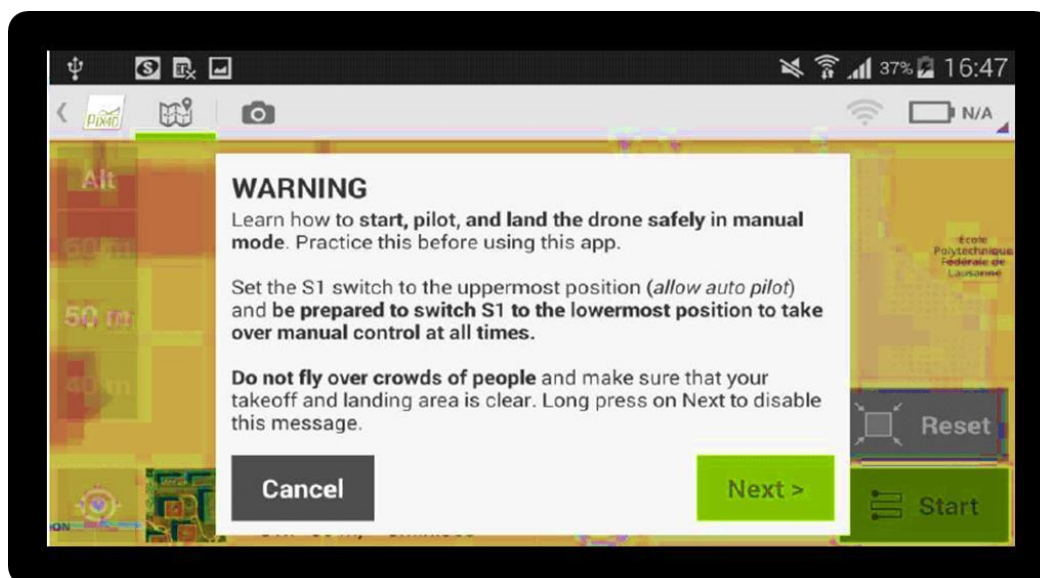


Figura 40. Advertencia y mensajes de precaución.

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Vuelo fotogramétrico

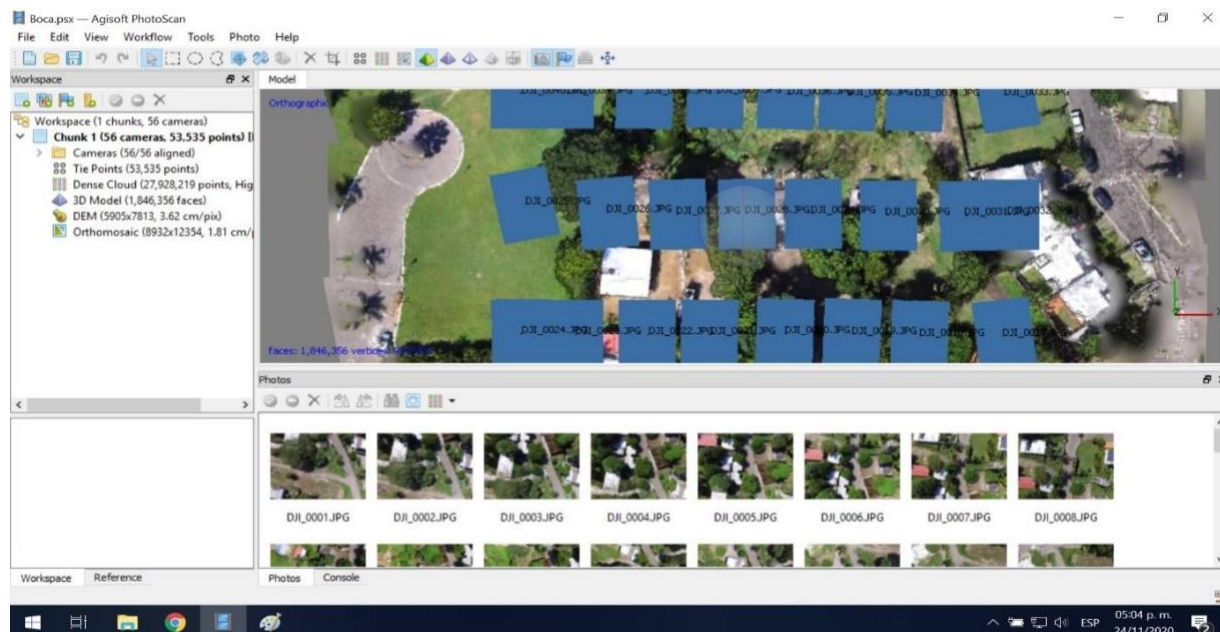


Figura 41. Proceso de alineamiento de fotografías

Fuente: Elaboración propia

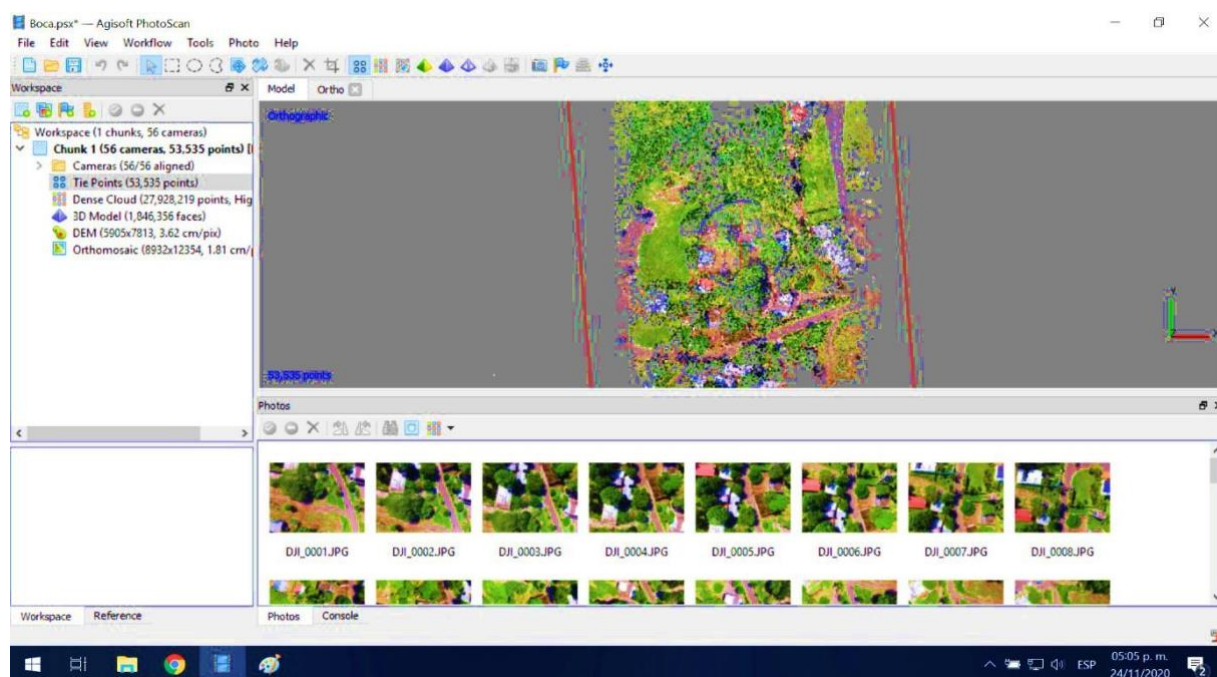


Figura 42. Nube de puntos primaria

Fuente: Elaboración propia

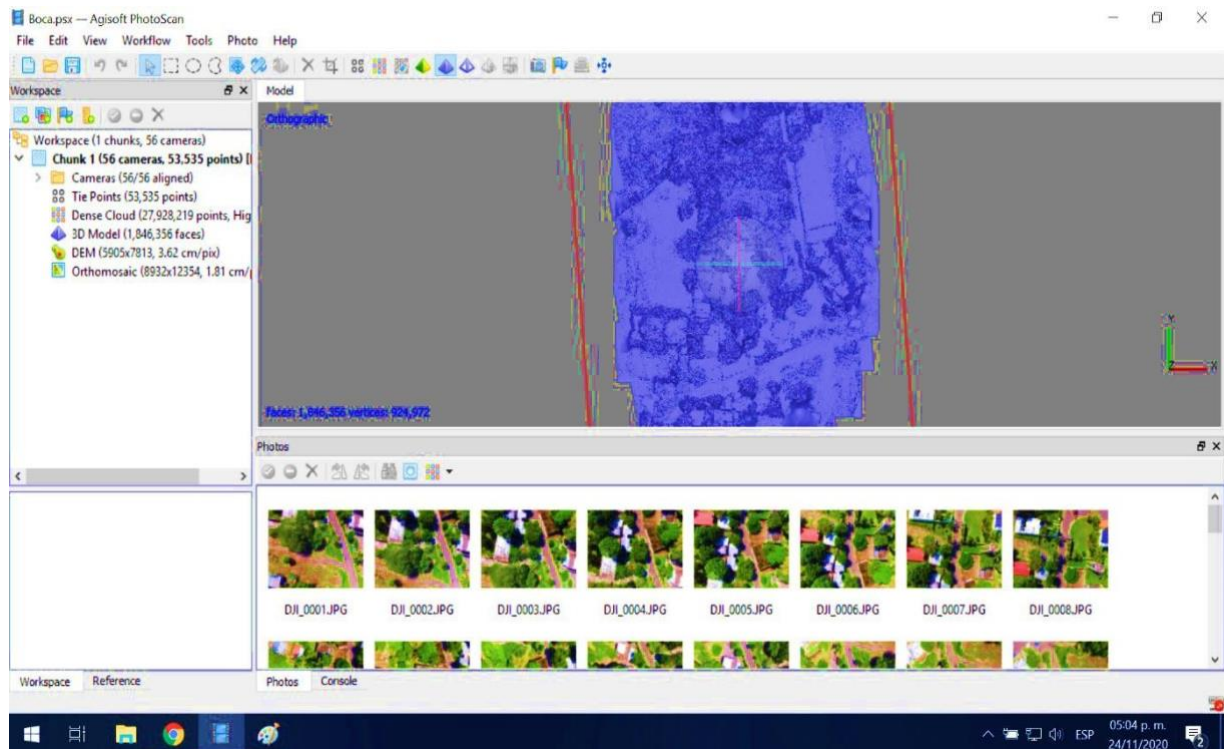


Figura 43. Renderizado del modelo

Fuente: Elaboración propia

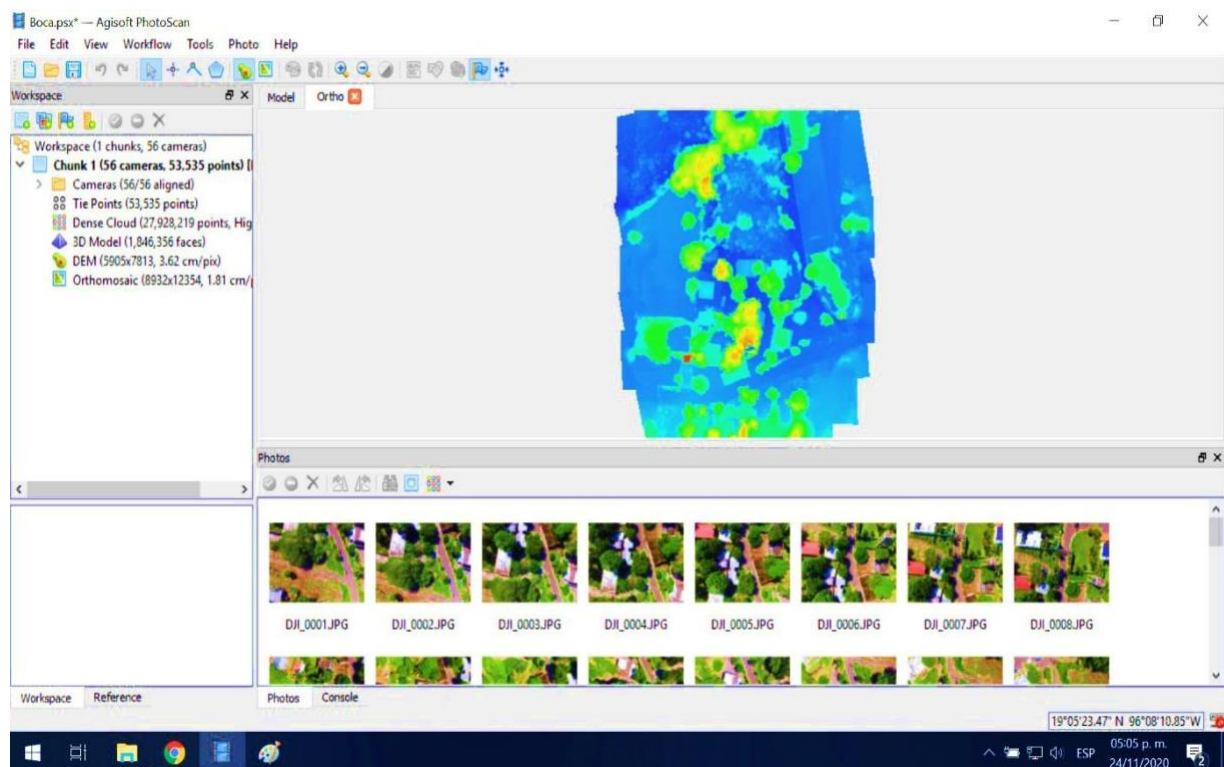


Figura 44. Modelo Digital de Elevación

Fuente: Elaboración propia

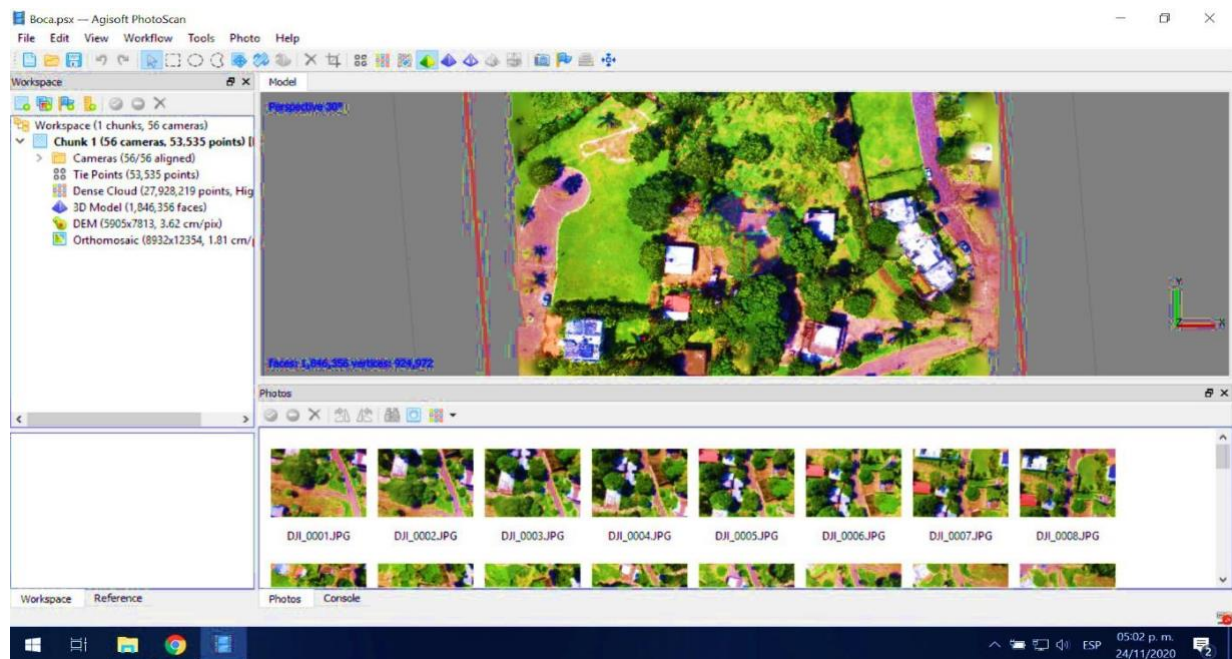


Figura 45. Orto rectificación de imágenes

Fuente: Elaboración propia

2.5 Reporte de vuelo

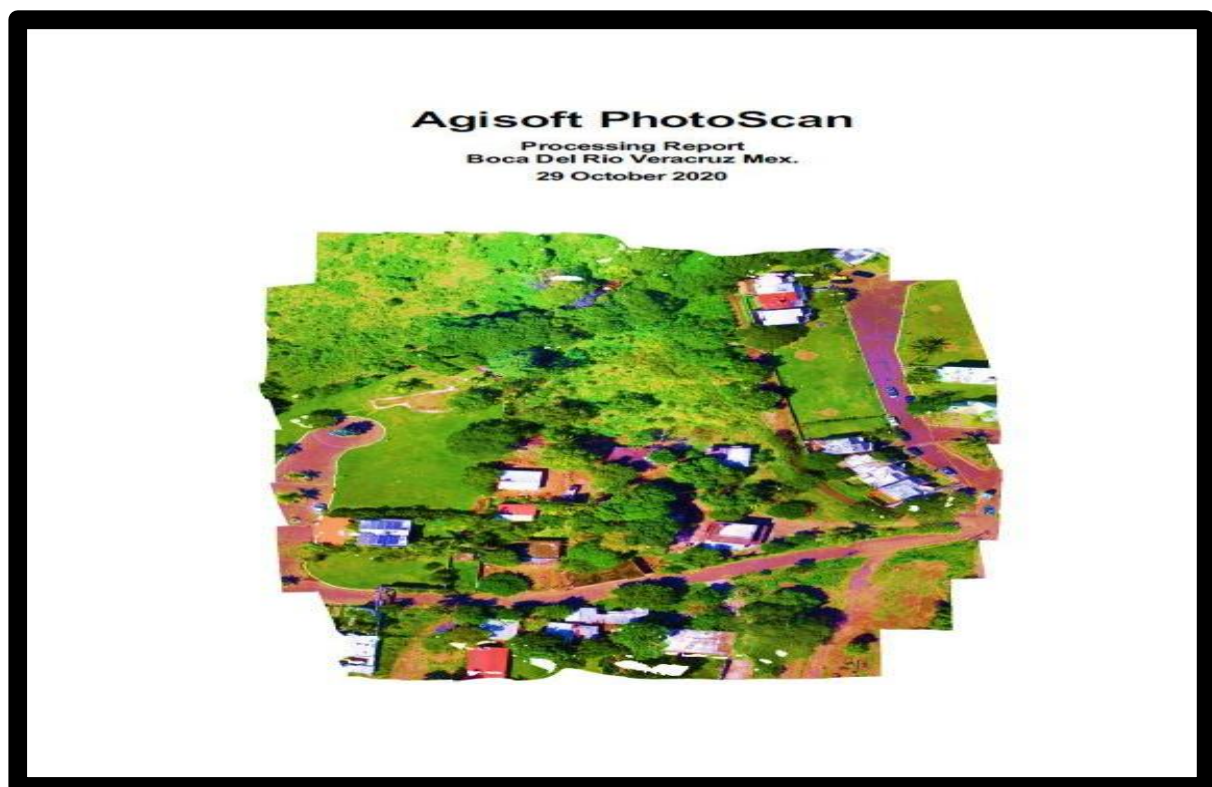


Figura 46. Mosaico orto rectificado.

Fuente: Elaboración propia.

Survey Data

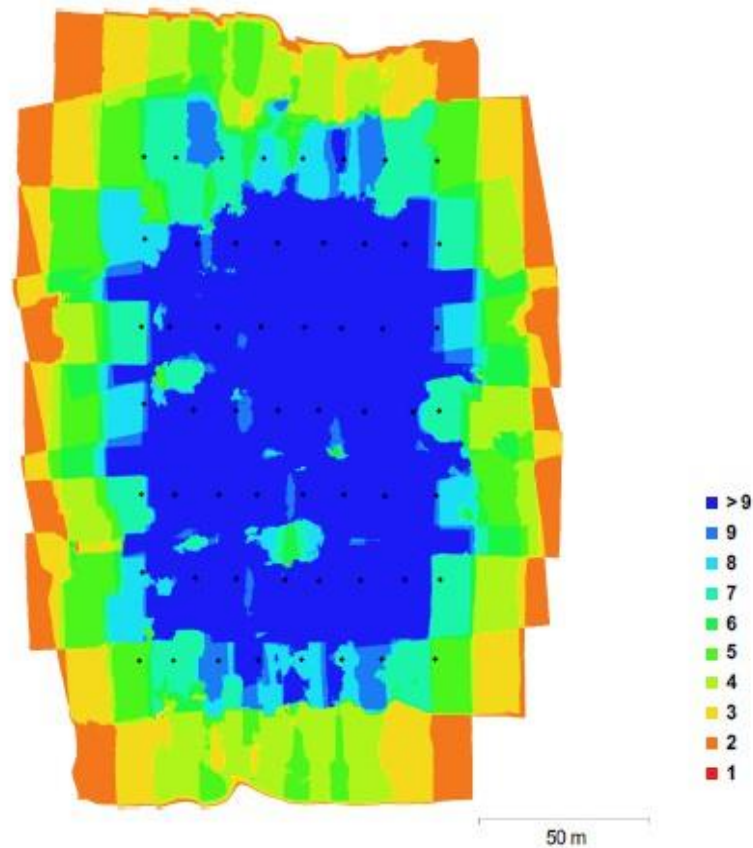


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	56	Camera stations:	56
Flying altitude:	56.4 m	Tie points:	53,535
Ground resolution:	1.81 cm/pix	Projections:	157,448
Coverage area:	3.19e+04 sq m	Reprojection error:	1.05 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC300C (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Figura 47. Análisis de traslapes y detalles técnicos de la ortofoto

Fuente: Elaboración propia

Camera Calibration

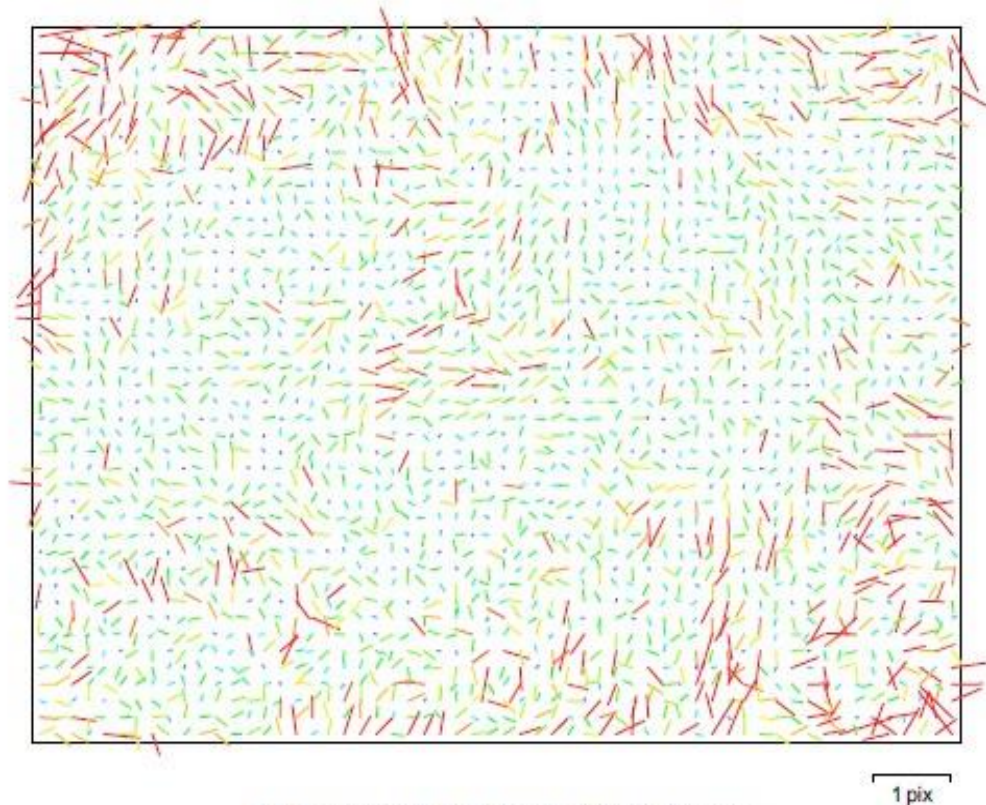


Fig. 2. Image residuals for FC300C (3.61 mm).

FC300C (3.61 mm)

56 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 um	No
Type:	Frame	Skew:	0
Fx:	2711.18	Cx:	2077
Fy:	2711.18	Cy:	1585.28
K1:	-0.136424	P1:	0.000509111
K2:	0.116492	P2:	0.000535901
K3:	-0.0197711	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Figura 48. Resultados de calibración de la ortofoto

Fuente: Elaboración propia

Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
0.587333	0.333337	0.675333	0.402903	0.786388

Table 2. Average camera location error.

Figura 49. Errores en el plan de vuelo de los ejes X, Y, Z.

Fuente: Elaboración propia

Digital Elevation Model

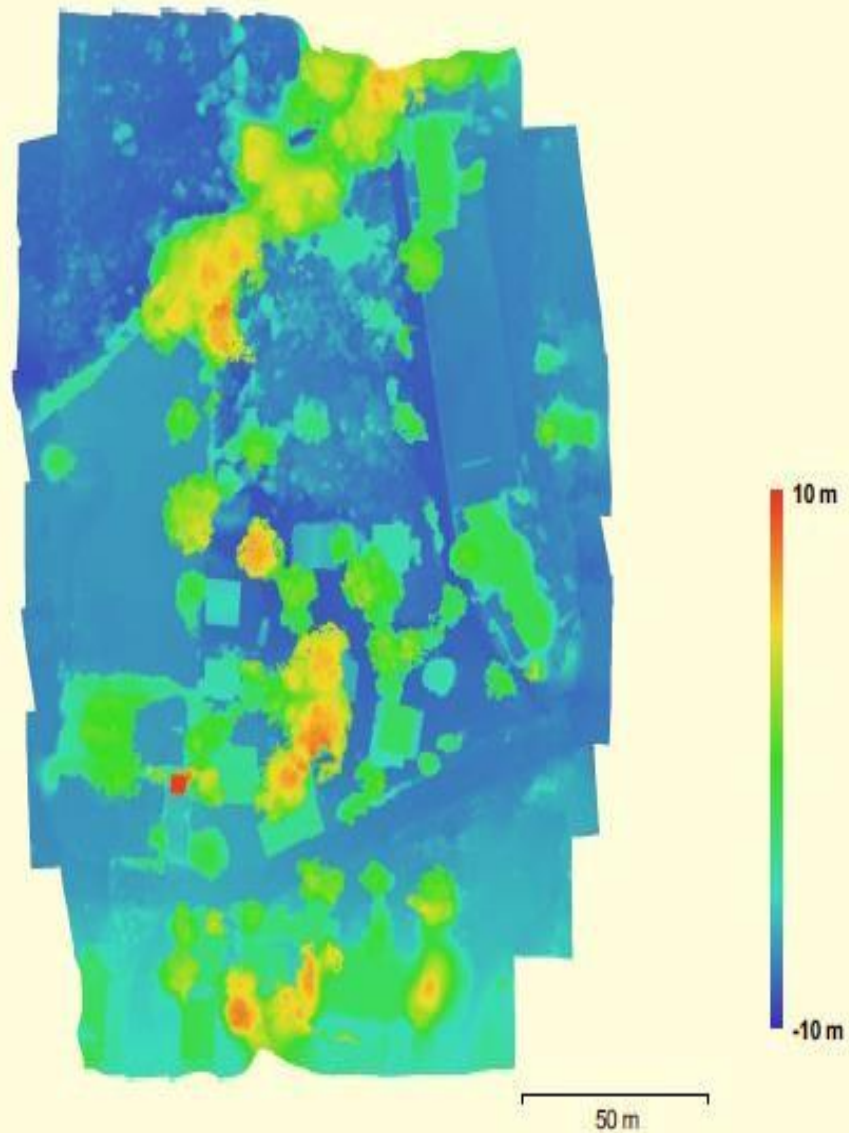


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.62 cm/pix
Point density: 761.703 points per sq m

Figura 50. Modelo Digital de Elevación de la ortofoto

Fuente: Elaboración propia

Processing Parameters

General	
Cameras	56
Aligned cameras	56
Coordinate system	WGS 84 (EPSG:4326)
Point Cloud	
Points	53,535 of 66,075
RMS reprojection error	0.247853 (1.0539 pix)
Max reprojection error	0.771806 (26.7439 pix)
Mean key point size	4.26659 pix
Effective overlap	3.1951
Alignment parameters	
Accuracy	High
Pair preselection	Disabled
Keypoint limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	No
Matching time	11 minutes 49 seconds
Alignment time	42 seconds
Dense Point Cloud	
Points	27,928,219
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Processing time	7 minutes 5 seconds
Model	
Faces	1,846,356
Vertices	924,972
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	1,861,881
Processing time	1 minutes 35 seconds
DEM	
Size	5,905 x 7,813
Coordinate system	WGS 84 (EPSG:4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Orthomosaic	
Size	8,932 x 12,354
Coordinate system	WGS 84 (EPSG:4326)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
Reconstruction parameters	
Surface	DEM
Enable color correction	No

Figura 51. Parámetros de procesamiento.

Fuente: Elaboración propia

"La utilización de la aplicación Pix4D Mapper App es fundamental para adquirir imágenes óptimas y planificar misiones de vuelo en la generación de modelos 3D precisos" (Pix4D, 2023, p.1).

"Esta herramienta permite a los usuarios planificar y capturar fotos de manera eficiente, garantizando una sincronización adecuada con el dispositivo. Además, proporciona indicaciones visuales sobre el tamaño y el color de la cuadrícula de vuelo, lo que ayuda al operador a tomar decisiones informadas para obtener resultados de alta calidad" (Pix4D, 2023, p.1).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 Resultado de la investigación bajo los siguientes términos:

Los resultados obtenidos son de acuerdo a los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, las soluciones adoptadas, el diseño o propuesta técnica utilizando técnicas tanto en gabinete como en el campo, así como el uso de software especializado, técnicas cartográficas y topográficas, los mismos han sido integrados para obtener finalmente el estudio.

“Con la utilización del método de levantamiento fotogramétrico digital con el drone Phantom 3 PROFESSIONAL, se obtienen similares resultados de áreas comparado con el método tradicional con una estación total”.

3.2 Georreferenciación

De los datos obtenidos post georreferenciación se ha obtenido el siguiente resultado:

COORDENADAS OBTENIDAS COORDENADAS ESTACIONES GEOREFERENCIADAS				
PTO	ESTE	NORTE	ELEV.	DESC.
1	269743.301	8664050.78	29.223	GPS 5
2	270119.116	8663894.274	32.447	GPS 6
3	269822.765	8663986.818	30.805	CVC 9
4	269054.634	8664302.58	24.211	CVC 8
5	268650.286	8664472.28	16.672	CVC 7
6	268007.409	8664735.197	9.270	CVC 6

7	267695.984	8664828.311	10.350	CVC 5
8	267034.512	8665008.061	8.728	CVC 4
9	266686.481	8665076.651	5.954	CVC 3
10	266410.896	8665099.701	7.231	CVC 2
11	266217.195	8665104.16	6.670	CVC 1
12	265586.98	8665181.414	3.542	GPS 2
13	265319.744	8665132.146	3.517	GPS 1
1	269743.301	8664050.78	29.223	GPS 5
2	270119.116	8663894.274	32.447	GPS 6
3	269822.765	8663986.818	30.805	CVC 9
4	269054.634	8664302.58	24.211	CVC 8
5	268650.286	8664472.28	16.672	CVC 7
6	268007.409	8664735.197	9.270	CVC 6
7	267695.984	8664828.311	10.350	CVC 5
8	267034.512	8665008.061	8.728	CVC 4
9	266686.481	8665076.651	5.954	CVC 3
10	266410.896	8665099.701	7.231	CVC 2
11	266217.195	8665104.16	6.670	CVC 1
12	265586.98	8665181.414	3.542	GPS 2
13	265319.744	8665132.146	3.517	GPS 1

Tabla 3. Datos para georreferencia de proyecto.

Fuente: Elaboración propia

"De los datos obtenidos después de la georreferenciación, se ha obtenido el siguiente resultado: La realización del levantamiento topográfico en la zona de comparación se llevó a cabo con el apoyo de una estación total de la marca Hi-Target de 5 segundos. Se marcaron o pintaron puntos de control terrestre con el fin de obtener las coordenadas y el control necesario para conocer las coordenadas de dichos puntos.

En cuanto a la calibración de la cámara, esta no fue necesaria, ya que al utilizar el software Pix4D App, preprogramado o en modo autónomo, este responde automáticamente sin necesidad de intervención, lo que evita la falta de precisión. Además, el software utilizado realiza una precálibración digital.

Por lo general, la calibración se realiza al utilizar otro software comercial como Photomodeler o Litchi, que sí requieren esta calibración. Sin embargo, este tipo de calibración se realiza en posición estática, es decir, las tomas se toman desde un trípode o con la cámara en una posición estacionaria. En cambio, el equipo UAV utilizado está en movimiento continuo y toma las fotos según lo requiera el software con el que se esté realizando la experiencia."

1	269926.347	8663947.62	30.951	RELL	44	269929.05	8663962.85	30.206	RELL
2	269922.914	8663948.35	31.007	RELL	45	269929.097	8663961.65	30.265	RELL
3	269917.715	8663950.19	30.983	RELL	46	269929.106	8663961.53	30.382	RELL
4	269910.872	8663953	30.843	RELL	47	269929.175	8663959.07	30.428	RELL
5	269905.196	8663955.43	30.736	RELL	48	269928.835	8663957.06	30.391	RELL
6	269902.276	8663957.46	30.740	RELL	49	269928.8	8663955.17	30.354	RELL
7	269902.412	8663959.27	30.683	RELL	50	269928.874	8663955.06	30.514	RELL
8	269902.87	8663960.57	30.345	RELL	51	269928.215	8663953.94	30.512	RELL
9	269903.434	8663962.66	30.181	RELL	52	269928.466	8663953.29	30.514	RELL
10	269903.445	8663962.8	30.284	RELL	53	269928.423	8663953.19	30.374	RELL
11	269904.082	8663963.79	30.287	RELL	54	269928.113	8663951.37	30.541	RELL
12	269904.473	8663964.5	30.277	RELL	55	269927.75	8663950.02	30.792	RELL
13	269904.899	8663964.78	30.138	RELL	56	269927.565	8663948.88	31.017	RELL
14	269906.918	8663967.67	30.200	RELL	57	269927.016	8663948	31.010	RELL
15	269908.407	8663971.27	30.178	RELL	58	269918.94	8663968.14	30.067	RELL
16	269908.45	8663971.33	30.373	RELL	59	269918.157	8663965.48	29.523	RELL
17	269908.861	8663971.46	30.391	RELL	60	269917.173	8663962.73	28.743	RELL
18	269909.212	8663971.7	30.331	RELL	61	269916.334	8663960.37	28.016	RELL
19	269909.45	8663971.93	30.280	RELL	62	269913.559	8663959.27	27.195	RELL
20	269909.636	8663971.96	30.138	RELL	63	269915.512	8663957.95	27.397	RELL
21	269911.429	8663971.37	30.097	RELL	64	269918.012	8663957.01	27.261	RELL
22	269912.281	8663971.25	30.176	RELL	65	269920.036	8663959.18	27.332	RELL
23	269914.193	8663970.28	30.211	RELL	66	269921.395	8663961.83	27.272	RELL
24	269916.086	8663969.33	30.217	RELL	67	269922.362	8663963.34	27.252	RELL
25	269916.751	8663968.64	30.147	RELL	68	269922.677	8663964.67	27.319	RELL
26	269916.769	8663967.88	29.935	RELL	69	269924.128	8663964.56	27.424	RELL
27	269916.051	8663965.7	29.409	RELL	70	269924.813	8663964.22	26.802	RELL
28	269915.431	8663964.5	29.107	RELL	71	269925.545	8663964.39	26.781	RELL
29	269915.752	8663963.92	28.920	RELL	72	269927.379	8663964.12	26.829	RELL
30	269914.775	8663962.51	28.418	RELL	73	269928.451	8663963.87	26.924	RELL
31	269914.3	8663960.67	27.862	RELL	74	269928.086	8663959.85	26.764	RELL
32	269918.284	8663959.3	27.898	RELL	75	269927.629	8663956.74	26.824	RELL
33	269918.95	8663961.05	28.538	RELL	76	269927.224	8663954.1	26.830	RELL
34	269919.572	8663962.97	29.040	RELL	77	269927.234	8663952.24	26.835	RELL
35	269920.499	8663966.13	29.888	RELL	78	269926.437	8663950.47	26.915	RELL
36	269920.869	8663966.63	30.064	RELL	79	269924.767	8663951.38	26.850	RELL
37	269921.48	8663966.82	30.324	RELL	80	269923.405	8663952.22	26.783	RELL
38	269923.49	8663966.14	30.311	RELL	81	269923.466	8663954.06	26.734	RELL
39	269924.974	8663965.53	30.140	RELL	82	269923.651	8663956.67	26.781	RELL
40	269926.458	8663965.4	30.300	RELL	83	269923.507	8663958.72	26.844	RELL
41	269928.048	8663965.44	30.378	RELL	84	269923.742	8663961.58	26.806	RELL
42	269928.823	8663965.11	30.398	RELL	85	269924.494	8663963.8	26.737	RELL
43	269929.042	8663964	30.469	RELL	86	269924.169	8663964.4	27.441	RELL
					87	269923.406	8663961.87	27.224	RELL
					88	269923.116	8663958.81	27.156	RELL
					89	269922.962	8663956.77	27.179	RELL
					90	269922.877	8663954.5	27.168	RELL

Tabla 4. Comparación con el método directo, puntos tomados con Estación Total

Fuente: Elaboración propia

Es mucho menor el tiempo empleado en campo con la técnica de fotogrametría con drones, con respecto al tiempo empleado con una estación total

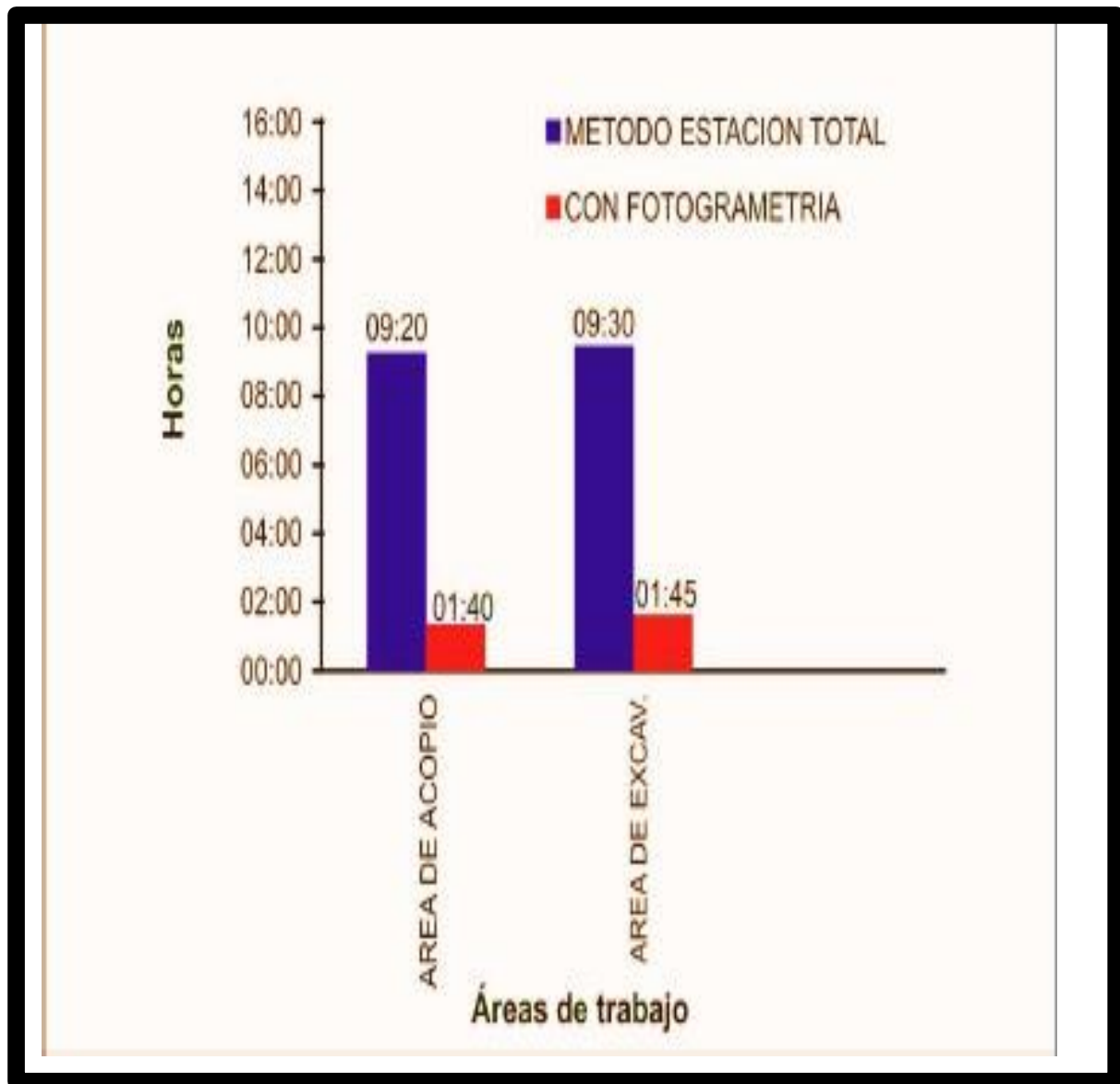


Figura 52. Comparativa métodos topográficos y fotogramétricos.

Fuente: Elaboración propia

"El uso de UAVs en fotogrametría ha demostrado ser considerablemente más eficiente en términos de tiempo en comparación con el uso de una estación total. Investigaciones previas han indicado que los levantamientos topográficos con UAVs pueden reducir significativamente los tiempos en el campo, logrando resultados precisos en un período mucho más corto."

Conclusiones

- Los datos obtenidos tanto con el equipo dron como con el aparato de Estación Total son confiables, con un grado de precisión del 95%, de acuerdo con los objetivos de este trabajo.
- La fotogrametría está ganando cada vez más relevancia debido al continuo avance tecnológico. Sin embargo, esto no significa que debamos descartar los métodos clásicos, ya que estos son fundamentales, por ejemplo, para calibrar los sensores de última tecnología.
- Los hallazgos de esta investigación indican que la combinación de técnicas fotogramétricas empleadas para realizar capturas extensas de puntos mediante imágenes capturadas desde sistemas aéreos no tripulados (UAVs) produce una variedad de productos fotogramétricos (como ortofotos, nubes de puntos, Modelos de Elevación Digital, Modelos Digitales del Terreno, entre otros) que pueden servir como documentación topográfica fundamental en la planificación y desarrollo de proyectos de ingeniería civil.
- La incorporación de estas metodologías de trabajo posibilita la generación de ortomosaicos de la zona de interés a una resolución excepcionalmente alta, lo que los convierte en un recurso invaluable en cualquier proyecto de ingeniería. Estos ortomosaicos permiten medir las coordenadas planimétricas con una precisión extraordinaria, realizar mediciones directas de distancias entre objetos reflejados en ellos con un nivel de detalle elevado, identificar y ubicar objetos a una escala mayor, y explorar elementos que podrían pasar desapercibidos a simple vista en el terreno o en un modelo topográfico generado mediante métodos topográficos convencionales, entre otros usos.
- Basándonos en los resultados obtenidos, recomendamos combinar la captura masiva de puntos a partir de imágenes de UAVs con las mediciones topográficas tradicionales. Esto proporciona una definición precisa del terreno y ahorra tiempo y costos. Con esta combinación, se reducirá la necesidad de realizar mediciones topográficas extensas en el campo, centrándose principalmente en las características clave del terreno y los puntos de apoyo, mientras que los datos del vuelo cubrirán el resto de la información necesaria.

Recomendaciones

- Con el trabajo realizado, y las circunstancias dadas, podemos decir que conviene un poco más el uso de dron de ala fija (otro tipo), para obtener resultados en menor tiempo.
- Se recomienda el uso de cámaras profesionales, como el tipo réflex, siempre y cuando se esté al alcance del operador o del proyecto.
- Se recomienda una planificación adecuada, tomando en cuenta otras variables que no son sujeto de este estudio, como son el suelo, la climatología, y reglamentos del lugar.
- "Se recomienda el uso de cámaras profesionales, como las cámaras réflex, debido a su capacidad para capturar imágenes de alta calidad y precisión. Estas cámaras ofrecen mayores opciones de configuración y control, lo que permite obtener resultados más precisos en la fotogrametría y generar modelos 3D de mayor detalle y resolución"
- Al utilizar drones, es aconsejable volar un área ligeramente más grande que la de interés para garantizar resultados precisos y evitar problemas como bordes recortados y distorsiones.
- Elige cuidadosamente la fecha y la hora para tus vuelos fotogramétricos. Prefiere las horas centrales del día, con el Sol a ≥ 40 grados sobre el horizonte, evitando condiciones climáticas adversas que puedan afectar la precisión del sensor de la cámara.
- Utiliza puntos de apoyo claramente visibles desde el aire para mejorar la precisión de tus tomas. Distribúyelos en toda la zona de vuelo y evita tener más de un punto de apoyo en una misma toma. No utilices dispositivos móviles ni GPS recreativos para determinar su ubicación.

Al seleccionar la altura de vuelo, equilibra la resolución deseada y la eficiencia del tiempo de procesamiento. Evita volar demasiado bajo en áreas densamente pobladas para evitar distorsiones en las ortofotos. Utiliza software de planificación de vuelo que ajuste automáticamente la altura en terrenos variados para mantener una altura constante sobre el terreno. Esto garantizará una captura de

datos precisa y eficiente.

Bibliografía

Agencia Informativa Conacyt. (2017, 25 de julio). Cartografía Digital con Drones. Cienciamx. <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/tic/16678-cartografia-digital-con-drones>

Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga. (2017, 15 de enero). En Tlajomulco drones actualizan catastro. Alcaldes de México. https://www.alcaldesdemexico.com/revista/expediente-abierto/en-tlajomulco-drones-actualizan-catastro/page/11/?et_blog

Cheli, A. E. (2011). Introducción a la Fotogrametría y su Evolución. Hespérides.

Delgado, V. (2016). Historia de los drones. Eldrone.es. <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. (2015). Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Gráficas Arias Montano. <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015384.pdf>

DTM Topografía. (2023, julio). Agisoft-Metashape. Metashape. <https://dtmtopografia.com/agisoft-metashape/>

García, F. (2017). Curso Básico de Topografía. Pax México.

García, M. S. (2017). Uso y Aplicaciones de Drones en Minería [Proyecto final de carrera, Manresa]. Repositorio Institucional.

Gobierno de México. (2015, 20 de julio). Utilizan un dron para estudiar zonas arqueológicas de Sinaloa. Secretaría de Educación Pública. <https://www.gob.mx/sep/articulos/utilizan-un-dron-para-estudiar-zonas-arqueologicas-de-sinaloa>

InfoAgro. (2019, 22 de agosto). Agricultura de precisión, la nueva alternativa sustentable. Informativo Agrícola de México. <https://mexico.infoagro.com/agricultura-de-precision-la-nueva-alternativa-sustentable/>

Instituto Mexicano del Transporte. (2023, 15 de mayo). Ventajas de la aplicación de equipos GPS para levantamientos topográficos en entornos costeros. Publicación bimestral de divulgación

externa. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=472&IdBoletin=174>

Montes, M. (2013). Topografía. Alfaomega.

Pix4D. (2023, 20 de agosto). Inicio de Proyectos. Pix4D Documentation.
<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360033641551-Paso-1-Antes-de-iniciar-un-proyecto-1-Dise%C3%B1ar-el-plan-de-adquisici%C3%B3n-de-imagen-a-Seleccionar-el-tipo-de-plan-de-adquisici%C3%B3n-de-imagen>

Santamaría, J., & Sanz, T. (2011). Fundamentos de Fotogrametría. Universidad de la Rioja.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2019, 14 de noviembre). Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. Diario Oficial de la Federación.
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/602732/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>

Umiles Group. (2022, 22 de octubre). Tipos de drones, clasificación por uso y características. UMILES. <https://umilesgroup.com/tipos-de-drones/>

Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). Topografía. Alfaomega.

Anexos

Especificaciones de Dron Phantom 3 DJI

Aeronave

Peso (Batería y Hélices Incluidas)	1216 g
Tamaño Diagonal (Hélices Excluidas)	350 mm
Velocidad Max. en Ascenso	5 m/s
Velocidad Max. en Descenso	3 m/s
Velocidad Max.	16 m/s (modo ATTI, sin viento)
Altura Max. de Servicio sobre el Nivel del Mar	6000 m (Límite de altura por defecto: 120 m sobre el punto de despegue)
Max. Duración de Vuelo	Aproximadamente 25 minutos
Temperatura de Funcionamiento	de 0°C a 40°C
Modo GPS	GPS
Máx. Duración de Vuelo	Aproximadamente 25 minutos

Cámara

Sensor	1/2.3", Píxeles efectivos 12M
Lente	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞
Rango ISO	100-3200 (video) 100-1600 (foto)
Velocidad Del Obturador	8s -1/8000s
Tamaño Max. de Imagen	4000×3000
Modos de Fotografía	- Disparo único - Disparo en ráfaga: 3/5/7 disparos - Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 - Horquilla de Exposición a 0.7EV Bias - Time-lapse
Modos de Video	2.7K: 2704 x1520p 24/25/30 (29.97) - FHD: 1920x1080p 24/25/30 - HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60
Tasa de Bits Max. de Almacenamiento de Video	40 Mbps
Formatos de Archivo Admitidos	FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB)
Tipos de Tarjetas SD Compatibles	Tarjeta Micro SD 8Gb incluida
Temperatura de Funcionamiento	de 0°C a 40°C

Rótula de Estabilización en 3 ejes

Rango de Control	Grado de inclinación de -90° a +30°
Estabilización	3 ejes (mov. horizontal, mov. vertical y rotación)

Mando de Control Remoto

Frecuencia	5.725 GHz-5.825 GHz, 922.7 MHz-927.7 MHz (Japón)
Distancia Máxima	FCC: 1000 m; CE: 500 m (En el exterior y sin obstáculos, altitud de vuelo 120m)
Temperatura de Funcionamiento	de 0°C a 40°C
Batería	2600 mAh LiPo 18650
Transmisor de Potencia (PIRE)	- FCC: 19 dBm - CE: 14 dBm
Voltaje de Funcionamiento	600 mA @ 3.7V
Voltaje de Funcionamiento	300 mA @ 7.4 V

Batería de Vuelo Inteligente

Capacidad	4480 mAh
Voltaje	15.2 V
Tipo de Batería	LiPo 4S
Energía	68 Wh
Peso Neto	365 g
Temperatura de Funcionamiento	de 5°C a 40°C
Potencia de Carga Máx.	100 W

Cargador de Batería

Voltaje	17.4 V
Potencia Nominal	57 W

Aplicación / Retransmisión en Directo

Aplicación Móvil	DJI GO
PIRE	100mW
Densidad Espectral de Potencia	2.4GHz ISM
Frecuencia de Funcionamiento de la Retransmisión en Directo	720P @ 30fps
Latencia	220ms
Latencia	220ms
Sistema Operativo Requerido	- iOS 8.0 o posterior - Android 4.1.2.0 posterior
Dispositivos Recomendados	Compatible con iPhone 5s, iPhone 6, iPhone 6 Plus, iPhone 6s, iPhone 6s Plus, iPod touch 6, iPad Pro, iPad Air, iPad Air Wi-Fi + Cellular, iPad mini 2, iPad mini 2 Wi-Fi + Cellular, iPad Air 2, iPad Air 2 Wi-Fi + Cellular, iPad mini 3, iPad mini 3 Wi-Fi + Cellular, iPad mini 4, y iPad mini 4 Wi-Fi + Cellular. Esta aplicación está optimizada para iPhone 5s, iPhone 6, iPhone 6 Plus, iPhone 6s and iPhone 6s Plus. Compatible con Samsung tabs 705c, Samsung S6, Samsung S5, Samsung NOTE4, Samsung NOTE3, Google Nexus 9, Google Nexus 7 II, Ascend Mate7, Huawei P8 Max, Nubia Z7 mini, Sony Xperia Z3, Mi 3, Mi PAD, Smartisan T1, Huawei Mate 8. *Disponible asistencia para otros dispositivos Android. Testeo y desarrollo en proceso.

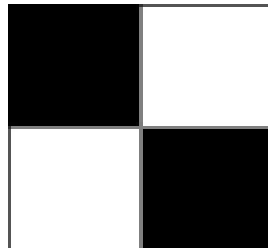
Puntos de Control Terrestre para Levantamientos Fotogrametricos con Dron

¿Qué es el punto de control terrestre en fotogrametría?

Los puntos de control terrestre (o GCP) son puntos en el terreno con coordenadas conocidas .

En un levantamiento cartográfico aéreo, los GCP son puntos que el topógrafo puede señalar con precisión: con un puñado de coordenadas conocidas, es posible mapear con precisión áreas grandes.

¿Por qué los GCP tienen ese aspecto?



Los puntos de control terrestre pueden ser cualquier cosa que pueda reconocerse fácilmente en las imágenes. Normalmente parecen una pequeña sección de un tablero de ajedrez. La forma deja muy poca ambigüedad sobre dónde está el "punto" de un punto de control terrestre.

Casi siempre son en blanco y negro porque es más fácil reconocer patrones de alto contraste.

Los puntos pueden medirse con métodos topográficos tradicionales, o haber utilizado LiDAR o un mapa existente, incluso Google Earth.

Google Earth y la precisión

La precisión de las coordenadas de Google Earth es, en el mejor de los casos, variable. **Un estudio encontró que la precisión variaba de 0,1 metros a 2,7 metros.** Incluso si esto no es suficiente para un topógrafo, puede resultar útil para proyectos que deben superponerse en un mapa de Google.

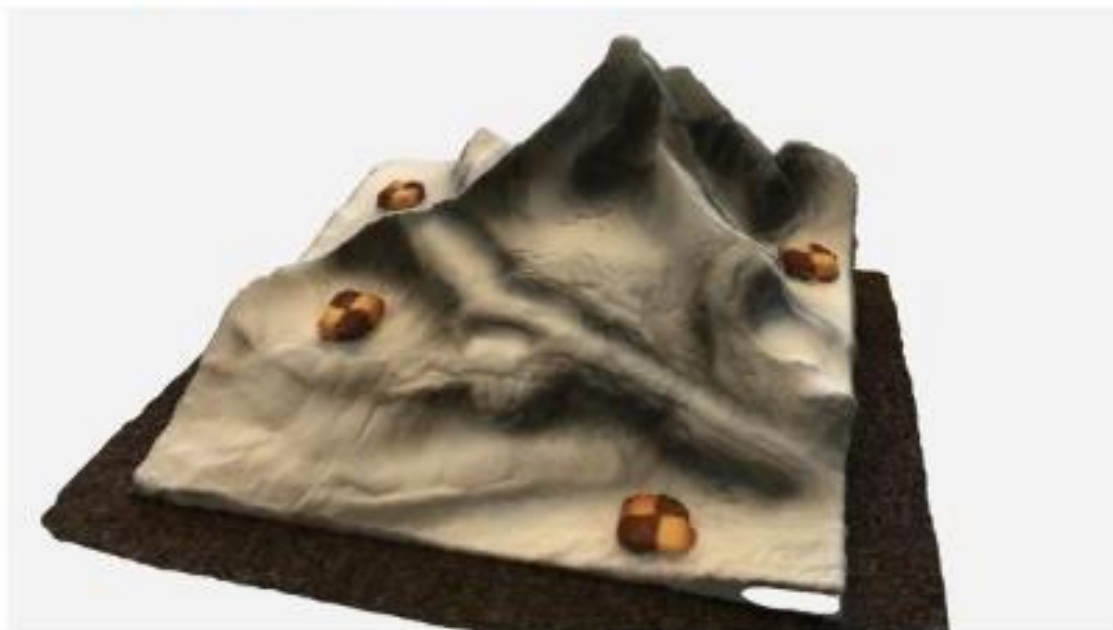
¿Cómo creo puntos de control terrestre?

Hay muchas formas de crear tus propios puntos de control terrestre y, en teoría, los GCP se pueden crear a partir de cualquier cosa. La regla general es utilizar colores de alto contraste (razón por la cual los puntos de control en tierra suelen ser blancos y negros) y asegurarse de que sean lo suficientemente grandes como para identificarlos desde su altitud de vuelo particular.

Es mejor utilizar materiales impermeables si piensas volver a utilizarlos y utilizar un acabado mate para reducir el deslumbramiento y mejorar la visibilidad.

Nuestros usuarios han creado puntos de control terrestre con postes de concreto (porque los GCP pintados seguían siendo arrastrados por la lluvia), pisos de vinilo, bases de béisbol y cartón.

Un equipo de Pix4Ders preparó GCP de galletas para probar esta teoría: funcionaron bien como puntos de enlace manuales, pero como no conocíamos las coordenadas precisas, no podemos decir que el modelo estuviera georreferenciado correctamente.



Este modelo impreso en 3D del Matterhorn se modeló mediante videogrametría y cookies. [Explore este modelo en Pix4D Cloud](#) o [pruebe la receta aquí](#)

GCP, puntos de enlace automáticos y manuales: ¿cuál es la diferencia?

En el software Pix4D, los puntos de enlace son puntos que existen en múltiples imágenes. Estos pueden ser detectados por el software (puntos de unión automáticos) o agregados manualmente por el usuario (puntos de unión manuales).



Un punto de enlace manual puede ser cualquier punto fácilmente identificable que aparezca en varias imágenes, como la esquina de una ventana.

Los puntos de unión manuales ayudan a mejorar la precisión relativa de un proyecto, pero no ayudan con la precisión absoluta, ya que su ubicación en el espacio no ha sido definida.



High relative accuracy



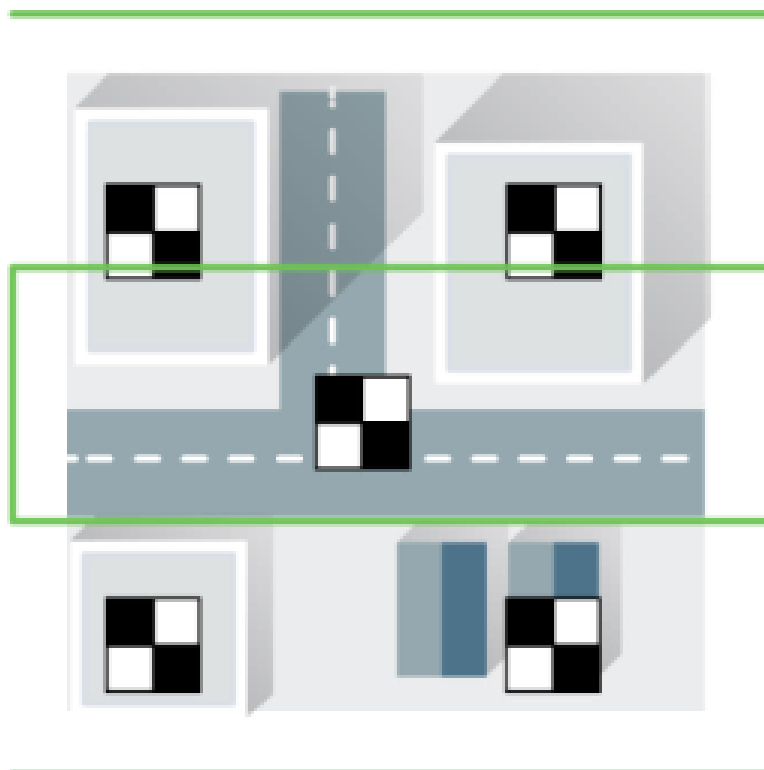
Low absolute accuracy



Este modelo de casa tiene una precisión relativa alta porque está correctamente reconstruida, pero una precisión absoluta baja porque está en el lugar equivocado.
[Lea más sobre este tema.](#)

¿Cómo elijo dónde colocar los puntos de control terrestre?

Si estuvieras examinando un cuadrado perfecto, sería fácil responder esa pregunta: un punto de control del terreno en cada esquina y otro en el centro.



El diseño ideal para puntos de control terrestre. [Lea más en el sitio de soporte de Pix4D](#)

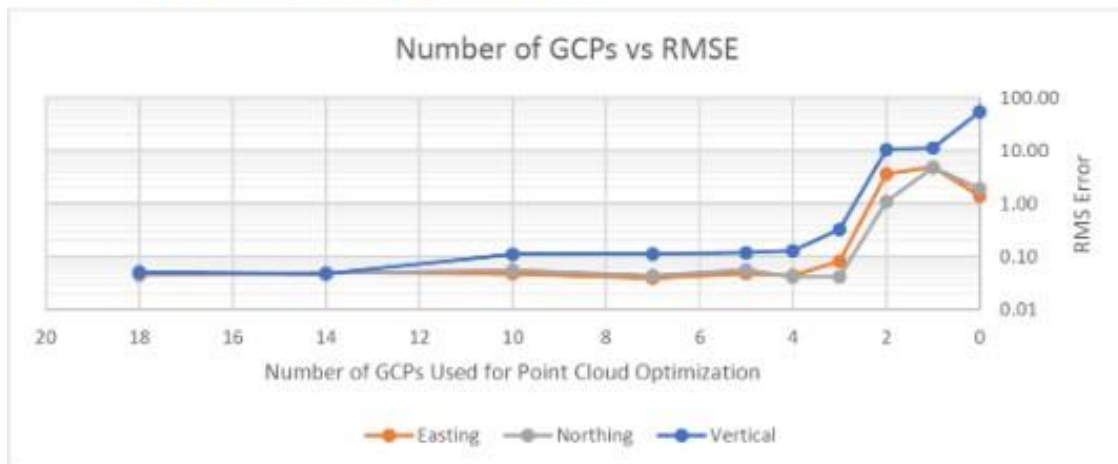
Las cosas rara vez son tan simples como eso. Estos consejos rápidos le ayudarán a colocar puntos de control terrestre para una mayor precisión.

- Mantente bajo. Los puntos de control terrestre deben estar en el terreno para obtener resultados consistentes.
- Tenga cuidado al elegir puntos de control terrestre "naturales". Algunas funciones (como los espacios de estacionamiento o las esquinas de los edificios) pueden ser demasiado repetitivas para ser útiles. Las sombras son tentadoras, pero pueden moverse incluso en el tiempo que lleva volar un sitio.
- Si el área no es perfectamente plana, coloque GCP en las diferentes elevaciones (en la cima y en la base de una colina, por ejemplo).
- Las pruebas externas muestran que, en general, no es necesario colocar docenas de puntos de control terrestre : el objetivo es entre 5 y 10.

¿Cuántos GCP se necesitan para un mapa aéreo preciso?

Quizás se sorprenda: pruebas independientes muestran que necesita menos BPC de los que cree para obtener resultados precisos.

El Departamento de Transporte de Nevada descubrió que colocar más de 5 a 10 GCP tenía muy pocos beneficios.



Un gráfico del estudio del Departamento de Transporte de Nevada que muestra el error cuadrático medio versus la cantidad de puntos de control terrestre utilizados. El eje vertical es logarítmico. [Lea más sobre este tema.](#)

Si bien colocar puntos de control terrestre puede llevar mucho tiempo, lleva menos tiempo que volver a volar un proyecto para mejorar la precisión. Recomendamos utilizar al menos cinco puntos de control terrestre.

Puntos de control en tierra pintados a mano: sacrificar la precisión por la velocidad

Los topógrafos que tienen prisa a veces cortan una X en el suelo con pintura en aerosol para usarla como GCP. Aún no se sabe si esto es mejor que nada.

Imagina una línea de pintura en aerosol: podría cubrir un palmo del alto. Pequeña en relación con un edificio, pero el "centro" no está claro en comparación con un GCP tradicional.



Encuentra la diferencia: las formas diferentes se marcan GCP

¿Dónde está el centro de cada una de las imágenes de arriba? Es fácil detectar el centro del GCP impreso a la derecha. En la X pintada con aerosol a la izquierda, el "centro" podría estar en cualquier lugar dentro de un área de 10 cm: suficiente para alterar los resultados.

Siempre recomendamos GCP de tablero de ajedrez en lugar de los pintados con aerosol. Si debes usar pintura en aerosol, pinta una letra L en lugar de una X y señala la esquina, en lugar del centro.



Los topógrafos están marcando la esquina, no el centro de la L. Este gran proyecto utilizó 160 GCP y puntos de unión.

Agregar GCP a un proyecto Pix4D

Ya colocó GCP en el campo, los marcó con precisión y realizó su encuesta. ¿Cuál es el siguiente paso?

La documentación de Pix4D tiene información detallada y actualizada sobre cómo incluir GCP en su proyecto.

¿Necesito utilizar siempre puntos de control terrestre?

Eso depende.

Los GCP han sido una parte tradicional de los proyectos de cartografía aérea. Sin embargo, esto está cambiando.

Si está utilizando un dron RTK, nuestras pruebas han encontrado que los puntos de control terrestre no mejoran significativamente la precisión.

Si su dron no está habilitado para RTK, siempre recomendamos el uso de GCP.

Señalar los puntos de control terrestre puede producir resultados perfectamente buenos, pero es posible que la reconstrucción no tenga la escala, la orientación o la información de posición absoluta correcta. Las etiquetas geográficas GCP o RTK pueden ayudarle a verificar la precisión de la reconstrucción.

El futuro de la precisión: AutoGCP

Pix4Dengine es una poderosa plataforma que impulsa la fotogrametría a escala. Y acaba de recibir una actualización importante.

AutoGCP es un nuevo módulo que actualmente es exclusivo de Pix4Dengine. Como sugiere el nombre, pueden detectar automáticamente GCP en su proyecto, completando con precisión una tarea manual más rígida. La combinación de aprendizaje automático y visión por computadora permite que el software identifique el centro exacto de un punto de control terrestre casi instantáneamente.

Las pruebas internas confirman que con los drones habilitados para RTK, los AutoGCP logran una precisión "superior a la de los píxeles", dice el líder del proyecto, Andrea Dotti. "Cuando las personas toman las medidas manualmente, los resultados son tan precisos como ellos".

Actualmente, la tecnología está limitada a Pix4Dengine: póngase en contacto con el equipo para probarla usted mismo.

Precisión ante todo

Como saben los profesionales (y entusiastas) de la topografía y la cartografía, la precisión es clave para el éxito de casi cualquier proyecto.

El uso de un dron para fotografía aérea puede producir imágenes de aspecto impresionante, pero la fotogrametría aérea requiere precisión y exactitud.

Hay una serie de herramientas que puede utilizar para lograr este objetivo, como continuaremos describiendo en esta serie de publicaciones. Los GCP son solo uno de ellos.