

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**

“IMPLEMENTACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA
CON RPA PARA MEJORAR LOS TIEMPOS EN LA
SUPERVISIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN DEL
CAMPAMENTO DE LA MINERA FENIX GOLD -
ATACAMA – CHILE”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Alejandro Martin Chalco Sulca

Asesor:

Ing. Edmundo Vereau Miranda

<https://orcid.org/0000-0003-1984-1734>

Lima - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Presidente(a) del Jurado	ING. JOSE LUIS NEYRA TORRES	21454204
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

Miembro del Jurado	ING. NEICER CAMPOS VASQUEZ	42584435
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

Miembro del Jurado	ING. RUBEN KEVIN MANTURANO CHIPANA	46905022
	Nombre y Apellidos	Nro. Colegiatura o DNI

INFORME DE SIMILITUD

Tesis Chalco Sulca

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	www.autodeskjournal.com Fuente de Internet	1%
2	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	1%
4	app.ign.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	dokumen.pub Fuente de Internet	1%
6	www.geocom.cl Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Tecsup Trabajo del estudiante	1%
8	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
9	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1%

DEDICATORIA

A mi padre, quien ya no está a nuestro lado hace dos años,

pero cuyo ejemplo de pasión, perseverancia

y libertad ha quedado en mí.

A mi madre, compañera de paciencia incansable.

A mis hermanas, por caminar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios, a la vida y a la posibilidad de realizar este trabajo.

Tabla de contenido

JURADO CALIFICADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
Tabla de contenido	6
Índice de tablas	10
Índice de figuras	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	15
Realidad Problemática	16
Marco Teórico	17
La Fotogrametría	17
Estereoscopia: Percepción Tridimensional.	18
La Fotogrametría en la Minería.	19
Aeronaves Tripuladas por Control Remoto (RPA – Remote Pilote Aircraft)	20
Tipos de RPA para Fotogrametría.	22
RPA de Ala Fija.	22
RPA multirrotores.	23
RPA Híbridos.	24
RPA con Tecnología RTK y PPK.	24
Consideraciones Para el Vuelo del RPA.	26
GSD (Ground Sample Distance) – Resolución de Fotografía.	26
Distancia Focal y Altura de Vuelo.	27

Apertura de Cámara.	28
Traslape u Overlap.	29
Puntos de Control Terrestre (PCT).	30
Receptor GPS Diferencial	32
Receptor Trimble R12i GNSS.	32
Métodos de Posicionamiento.	34
Método Estático Estándar.	34
Método Estático Rápido.	35
Método Cinemático.	36
Método en Tiempo Real - Real Time Kinematic (RTK).	36
Planificación de Vuelo	37
Software de Procesamiento de Imágenes (Agisoft Metashape)	38
Software de Diseño Civil (AutocadCivil 3D)	39
Antecedentes	40
Antecedentes Internacionales	40
Antecedentes Nacionales	41
Formulación del Problema	44
Problema General	44
Problema Específicos	44
Objetivos	44
Objetivo General	44
Objetivo Específicos	44
Hipótesis	45
Hipótesis General	45
Hipótesis Específicas	45
Justificación	45
Limitaciones	46
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	47

Tipo de Investigación	47
Diseño de la Investigación	47
Población y Muestra	48
Población	48
Muestra	48
Técnicas, Instrumentos y Procedimientos de Recolección de Datos	48
La Observación	49
Documental	49
Instrumentos	50
Procedimientos de Recolección de Datos - General	51
Procedimiento de Recolección de Datos - Fase de Campo	52
Procedimientos de Recolección de Datos - Fase de Gabinete	53
Aspectos Éticos	53
CAPÍTULO III: RESULTADOS	55
Ubicación del Área de Estudio	55
Plan de Vuelo	58
Puntos de Control Terrestre	59
Procesamiento de Imágenes	61
Importar Imágenes	61
Orientar Fotografías	61
Ingresar Puntos de Control Terrestre y Puntos de Control de Calidad	62
Crear Nube de puntos Densa	63
Crear malla	64
Crear Texturas	64

Crear Modelo de Teselas	64
Crear Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	65
Crear Ortomosaico	66
Generar Informe de Procesamiento	67
Elaboración de Planos para Supervisión.	69
Análisis de Avance de Obras	71
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	75
Discusión	75
Conclusiones	76
Referencias	78
Anexos	82
Anexo N° 1: Informe de procesamiento	82
Anexo N° 2: Planos	92

Índice de tablas

Tabla 1	Traslape recomendado por tipo de terreno	30
Tabla 2	Precisión del receptor Trimble R12i GNSS	33
Tabla 3	Parámetros de configuración en el plan de vuelo	58
Tabla 4	Coordenadas de puntos de control terrestre	59
Tabla 5	Resumen de informe de procesamiento	68
Tabla 6	Comparación de tiempos utilizados en la supervisión	77

Índice de figuras

Figura 1	Demostración de la vista estereoscópica	19
Figura 2	Ubicación de los VANT en la teledetección	21
Figura 3	Representación gráfica de RPA de ala fija VANT Ebee X	22
Figura 4	Representación gráfica de RPA multirrotor Matrice 300 RTK	23
Figura 5	Representación gráfica de RPA híbrido Wintra	24
Figura 6	Enlace RTK con conexión sin interrupciones	25
Figura 7	Enlace PPK con conexión interrumpida	26
Figura 8	Representación del GSD	27
Figura 9	Representación de la distancia focal y la altura de vuelo	28
Figura 10	Representación del área enfocada según la apertura de cámara	29
Figura 11	Representación del traslape de fotografías en la trayectoria de vuelo	30
Figura 12	Representación de punto control terrestre ubicado en terreno	31
Figura 13	Receptor Trimble R12i GNSS	34
Figura 14	Espacio de trabajo del software de procesamiento Agisoft Metashape	39
Figura 15	Ubicación del área de estudio	55
Figura 16	Cronograma de construcción de campamento	57
Figura 17	Módulos de campamento proyectados	57
Figura 18	RPA (Drone) DJI Matrice 300 RTK	59
Figura 19	Ubicación de puntos de control terrestre	60
Figura 20	Ubicación de fotografías en la trayectoria de vuelo	61
Figura 21	Fotografías orientadas con nube de puntos dispersa	62
Figura 22	Ubicación de puntos de control terrestre y puntos de control de calidad	63
Figura 23	Nube de puntos densa	63

Figura 24	Generación de texturas del proyecto	64
Figura 25	Modelo de teselas del proyecto	65
Figura 26	Modelo digital de elevaciones (MDE)	66
Figura 27	Ortomosaico del proyecto	67
Figura 28	Avance de obras al 01 de diciembre del 2021	69
Figura 29	Avance de obras al 25 de marzo del 2022	70
Figura 30	Avance de obras al 01 de mayo del 2022	70
Figura 31	Plano de avance de obras al 01 de diciembre del 2021 – Zona central	71
Figura 32	Cronograma de avance de obras al 01 de diciembre del 2021 – Zona central	72
Figura 33	Avance de obras al 25 de marzo del 2022 – Zona central	73
Figura 34	Cronograma de avance de obras al 25 de marzo del 2022 – Zona central	73
Figura 35	Avance de obras al 01 de mayo del 2022 – Zona central	74

RESUMEN

La siguiente investigación tiene el objeto de implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos en la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile. Los tiempos de la supervisión en la construcción minera es un factor importante que asegura el flujo continuo del proyecto; sin embargo, al tratarse de obras de gran magnitud, las tareas de supervisión se toman tiempos mayores a los estimados, pudiendo tener implicancia directa en los re trabajos por no permitir la detección de interferencias o incumplimientos en el diseño.

En el desarrollo de esta investigación se recopila información de campo en forma de imágenes del avance de obras de construcción del campamento mediante vuelos fotogramétricos con puntos de control terrestre previamente planificados. Así mismo, en gabinete se procesan las imágenes hasta la obtención de productos como modelos de elevación (MDE) y ortomosaicos que servirán para la supervisión en el análisis del avance de obra de las partidas externas o superficiales tales como: replanteo, trazados, excavaciones, rellenos de hormigón, montaje de fundaciones y montaje modular.

Finalmente, el trabajo de investigación confirma que la implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama- Chile, pues, con los productos obtenidos se optimizó los tiempos de supervisión del avance de obra desde el punto de vista constructivo y de permisos, garantizando la continuidad del proyecto.

PALABRAS CLAVES: Fotogrametría, RPA, supervisión, campamento minero

ABSTRACT

The following research aims to implement photogrammetry with RPA to improve the times in the supervision of the construction of the Fenix Gold – Atacama – Chile mining camp.

The timing of supervision in mining construction is an important factor that ensures the continuous flow of the project; However, as they are works of great magnitude, the supervision tasks take longer than the estimated times, and may have direct implications in the rework because it does not allow the detection of interferences or breaches in the design.

In the development of this research, field information is collected in the form of images of the progress of construction works of the camp through photogrammetric flights with previously planned ground control points. Likewise, in the cabinet the images are processed until obtaining products such as elevation models (MDE) and orthomosaics that will serve for the supervision in the analysis of the progress of work of the external or superficial items such as: stakeout, layouts, excavations, concrete fillings, assembly of foundations and modular assembly.

Finally, the research work confirms that the implementation of photogrammetry with RPA improves the times of the supervision of the construction of the camp of the mining company Fenix Gold – Atacama – Chile, since, with the products obtained, the times of supervision of the progress of the work were optimized from the constructive point of view and permits, ensuring the continuity of the project.

KEY WORDS: Photogrammetry, RPA, supervision, mining camp

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En la actualidad como lo sostiene Castro (2022):

Los drones (RPA/RPAS) han cobrado gran relevancia debido a que han encajado perfectamente en los dos objetivos clave de esta área: Seguridad y productividad.

La actividad topográfica de levantar información de los frentes de minado, mapeo de taludes, stockpiles, botaderos, PAD's, pozas, drenajes, etc. se realiza casi de manera diaria a la par del dinamismo de las actividades en Site. Equipos como el Matrice 300 RTK de DJI, el Wingtra one de Wingtra AG o el Ebee de Sensefly ofrecen la capacidad de levantar áreas extensas ya que cuentan con una buena autonomía de batería y sensores de gran resolución que permiten volar a mayor altura manteniendo una buena resolución (GSD). (El uso de drones en proyectos mineros, párr. 1)

Las construcciones de ingeniería civil en las zonas mineras se encuentran en constante desarrollo y es vital que esta se realice con una metodología minuciosa de desarrollo, pues existen muchos factores que afectan las distintas etapas de la fase constructiva y no todos se controlan o supervisan a tiempo, lo que hace que el producto final no cumpla con los requerimientos ideales para los que se diseñaron.

Solís (2004), menciona que “la supervisión de obra es un factor determinante en el éxito o el fracaso de un proyecto, pues un gran número de problemas en obras se atribuyen principalmente al mal desempeño de la supervisión” (p. 1). Así mismo, en el estudio de Torres, (2021), menciona que los recorridos de revisión de la supervisión en obras de gran magnitud sobre pasan los tiempos estimados, por ende, no se puede realizar una supervisión constante para detectar problemas ni dar soluciones que aseguren el flujo continuo del proyecto. (p. 14).

Ante esto, la siguiente investigación tiene como objetivo implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos en la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Realidad Problemática

Como lo sostiene Solís (2004):

La supervisión de obra puede ser un factor determinante tanto para el éxito, como para el fracaso de un proyecto, un número grande de problemas en obra no son atribuibles a deficiencias del diseño o de los materiales, sino principalmente, al mal desempeño de la supervisión; el supervisor de obra se enfrenta no solo a problemas de carácter técnico, sino también a conflictos generados por la interacción humana. (p. 1).

Además, Torres (2021) afirma que:

Uno de los constantes retos es mantener actualizada la información sobre el avance de la obra debido a que por la magnitud de los proyectos, los recorridos de obra gastan mucho tiempo en realizarse, por ende no se puede hacer una supervisión constante y no es posible tener la información a tiempo, esto suele generar mala comunicación entre las partes interesadas y por consiguiente no es posible detectar problemas ni soluciones a tiempo para asegurar un buen desarrollo en la ejecución de la obra. (p. 14)

Así mismo, los tiempos de la supervisión en la construcción del campamento minero es un factor importante, pues al ser una de las primeras etapas de un proyecto minero, influyen directamente en la trazabilidad de la cadena productiva; sin embargo, al tratarse de obras de gran magnitud, las tareas de supervisión se toman tiempos mayores a

los estimados, teniendo implicancia directa en los retrasos de obra por no permitir la detección de interferencias o incumplimientos en el diseño aprobado.

Para fines de estudio hemos tomado al campamento minero del proyecto Fenix Gold porque presenta características comunes de un campamento minero, por lo que beneficiará el desarrollo de esta investigación donde se implementará la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos en la supervisión de la construcción. El campamento está ubicado en la región Atacama – Chile y el área en estudio es de 30 ha. aproximadamente.

Marco Teórico

La Fotogrametría

Fotogrametría es simplemente medir con fotografías. Según la ISPRS (2014, como se citó en Silva, 2020) es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías, para de esa manera obtener características geométricas del objeto fotografiado. Por otro lado, según la ASPRS (2014, como se citó en Silva, 2020) es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos. Es importante indicar que la fotogrametría es parte de las ciencias geodésicas dado su propósito de mapeo en las más diversas escalas de representación. También, durante la última década, ha tenido una fuerte repercusión en la visión robótica dada su fuerte conexión con el procesamiento de imágenes digitales. (Stachniss, 2016, como se citó en Silva, 2020).

Actualmente, la fotogrametría ha aportado considerablemente en la ingeniería teniendo en cuenta el advenimiento de los drones y los adelantos en las cámaras fotográficas llegando a ser una técnica de captura masiva de datos geoespaciales muy productiva. (Silva, 2020, ¿Que es fotogrametría?, párr. 1-2)

Estereoscopia: Percepción Tridimensional.

El principio fundamental en el que se sustenta la fotogrametría se conoce como estereoscopia que da origen a la percepción tridimensional. El mejor ejemplo para explicar la estereoscopia está dado en la visión: cada ojo recoge imágenes ligeramente diferentes, las cuales por medio de un procesamiento realizado por el cerebro permiten la percepción tridimensional o en profundidad como se muestra en la figura 1. Este fenómeno se puede replicar en dos fotografías consecutivas mientras exista traslape entre ellas: sólo se necesita reconstituir la posición y orientación exactas del momento en que se fotografió.

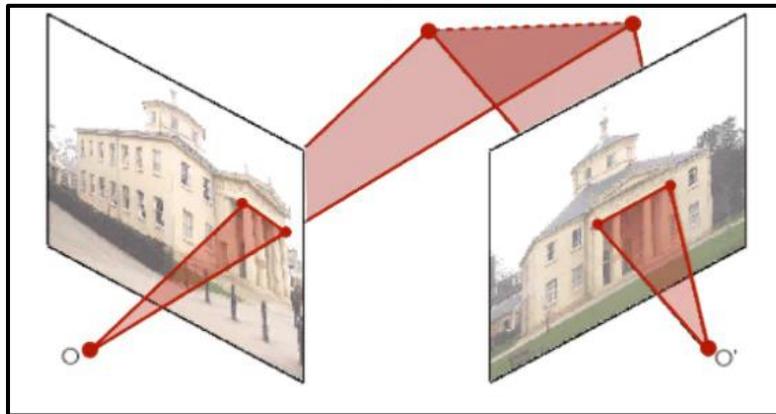
En el caso de la aerofotogrametría, la aeronave –que lleva consigo la cámara– realiza una secuencia de vuelo programada en la cual captura fotografías con cierto traslape. Esta técnica de captura de fotografías puede estar dada en base al tiempo o a la posición dependiendo de las características de la aeronave y/o de la cámara fotográfica en conjunto con su sistema de navegación.

De esta forma, las fotografías se adquieren siguiendo líneas –más conocidas como líneas de vuelo– las cuales siguen una dirección de acuerdo a las características geográficas del lugar a representar y, en varias ocasiones, considerando la dirección del viento con el objetivo de optimizar el vuelo.

Finalmente, a partir de un par consecutivo de fotografías, llamado par estereoscópico, a través de la medición de direcciones se genera una triangulación que posibilita la determinación de las coordenadas de puntos en el espacio. Este proceso cuando se realiza en bloque (con todas las fotografías) se conoce como aerotriangulación y ha sido el elemento determinante para la fotogrametría actual. (Silva, 2020, Estereoscopia: Percepción tridimensional, párr. 1-4)

Figura 1

Demostración de la vista estereoscópica



Nota: Adaptado de *Estereoscopia: percepción tridimensional*, de Silva, 2020, Geocom (<https://www.geocom.cl>).

La Fotogrametría en la Minería.

La fotogrametría es una técnica de medición e interpretación confiable a través de fotografías. En la minería, la fotogrametría ha permitido la representación tridimensional masiva de rajes abiertos, así como también, de plantas e instalaciones industriales con una variedad de finalidades.

Hasta hace un par de décadas, la fotogrametría era un recurso de representación topográfica a gran escala que cubría faenas completas con resoluciones temporales que no permitían análisis en brechas de tiempo muy cortas.

Actualmente este escenario ha cambiado drásticamente gracias a la inmediatez que

proveen los drones en la captura de fotografías, llevando a la fotogrametría aérea a convertirse en una de las técnicas más usadas para la representación topográfica dadas sus ventajas de precisión y productividad considerando superficies muy extensas.

La fotogrametría tiene dos productos principales: nubes de puntos masivas y ortofotos. Las nubes de puntos responden a un conjunto de posiciones tridimensionales que constituyen con un cierto grado de detalle una superficie de interés. En el caso de la minería, la superficie de interés puede ser un rajo abierto, un botadero, una pila de lixiviación, entre otros. El grado de detalle puede llegar fácilmente a una resolución espacial del orden de unos pocos centímetros dando paso a diferentes tipos de aplicaciones en donde la adquisición de datos puede ser riesgosa o comprometedora. Por otra parte, la fotogrametría facilita la representación en lugares donde las técnicas de adquisición de puntos discretos son poco productivas o simplemente no pueden aplicarse. En un ámbito más cualitativo, las ortofotos simplifican el entendimiento de planos topográficos ofreciendo una vista aérea detallada que contribuye activamente, por ejemplo, en la planificación minera de corto y mediano plazo. (Silva, 2020, párr. 1-3)

Aeronaves Tripuladas por Control Remoto (RPA – Remote Pilote Aircraft)

Son conocidos también como VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), o más conocido como dron, estos vehículos llamados aeronaves, que no necesitan tripulación para volar, son capaces de realizar vuelo de manera autónoma de forma controlada y sostenible, son impulsadas por un motor de explosión, sea eléctrico o reacción.

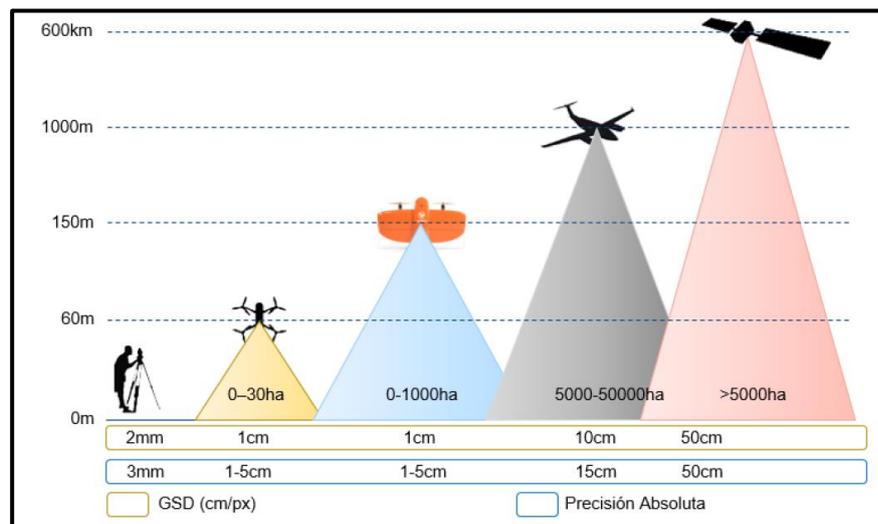
Para el uso que se le pueda dar existen diferentes clasificaciones, podemos clasificarlo en dos grandes grupos: Para uso militar y de uso civil.

Los drones de uso militar ya son usados desde hace 100 años, en cambio el uso civil recién toma notoriedad desde la última década; en parte gracias a los grandes saltos que la tecnología ha obtenido en tema de procesadores rápidos, baratos, y que no decir de las baterías ligeras, todo esto ha permitido que los equipos sean usados para recreación y para uso de bajo costo para el rubro audiovisual. (Sánchez, 2017, p. 12)

En función a la cobertura y la resolución como se muestra en la figura 2, podemos ubicar a la tecnología de los drones por encima de los levantamientos topográficos convencionales, y por debajo de los aviones tripulados y satélites artificiales que orbitan la tierra, con los cuales también es posible realizar fotogrametría. (Pari y Sedano, 2019, p. 38)

Figura 2

Ubicación de los VANT en la teledetección



Nota: Adaptado de VANT en la Teledetección, de Pari y Sedano, 2019.

Tipos de RPA para Fotogrametría.

RPA de Ala Fija.

Como se muestra en la figura 3, los RPA de ala fija presentan un diseño similar al de un avión, pero de pequeñas dimensiones, el cual es una gran ventaja ya que hace posible un excelente desempeño aerodinámico que incrementa su autonomía de vuelo de hasta 59 min. Se debe a su diseño y la mínima resistencia que ofrece el aire durante el vuelo. Estos drones están orientados básicamente para sobrevolar áreas de gran envergadura, de hasta 1,200 ha. por vuelo, áreas relativamente planas o relieve no muy accidentado, tienen buena estabilidad durante el vuelo, alcanzan los 110 km/h en velocidad crucero, los aterrizajes suelen ser un poco aparatosos si no se cuenta con área adecuada. (Pari y Sedano, 2019, p. 39)

Figura 3

Representación gráfica de RPA de ala fija VANT Ebee X



Nota: Recuperado de *RPA de ala fija Ebee X*. de ageagle, 2023, Ageagle (<https://ageagle.com>).

RPA multirrotores.

Los RPA multirrotores o de ala rotatoria, son aquellos que tienen al menos dos hélices helicóptero, cuatro hélices cuadricóptero, seis hélices hexacóptero y ocho hélices octocóptero; Estos son el tipo de drones más comunes, por su facilidad para volar, dimensiones pequeñas, fácil transporte y bajo costo.

La autonomía de estos drones generalmente no supera los 30 minutos de vuelo, están más orientados para registrar información audiovisual, pero también existen algunos modelos diseñados específicamente para realizar fotogrametría profesional como lo es el RPA Matrice 300 RTK mostrado en la figura 4, sus principales limitantes son: poca resistencia a la velocidad del viento y baja velocidad durante el vuelo, por tanto, el área a cubrir durante una misión será de entre 20 – 60 Ha. (Pari y Sedano, 2019, p. 40)

Figura 4

Representación gráfica de RPA multirrotor Matrice 300 RTK



Nota: Elaboración propia.

RPA Híbridos.

Los RPA híbridos son una mezcla de los drones de ala fija y los multirrotores, es de suponer que despegar y aterrizar como un multirrotores como se muestra en la figura 5, pero vuela como un avión, una de las ventajas es su gran autonomía durante el vuelo y su precisión al momento del aterrizaje, son capaces de llevar cámaras de gran resolución además de estar equipados con diferentes tipos de receptores GNSS. (Pari y Sedano, 2019, p. 41)

Figura 5

Representación gráfica de RPA híbrido Wintra



Nota: Recuperado de *RPA híbrido Wintra*, de Wintra, 2023, Wintra (<https://wingtra.com>).

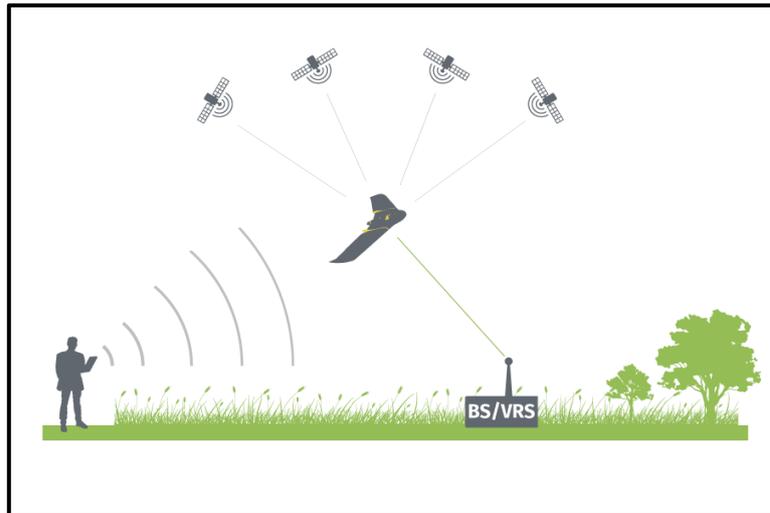
RPA con Tecnología RTK y PPK.

Con una conexión de enlace de datos, como GSM o Wi-Fi, un dron RTK se conectará a una estación base o una estación de referencia virtual (VRS) a través de la computadora portátil que controla el vuelo. Las posiciones de la cámara se calculan en tiempo real, haciendo referencia a esta referencia de tierra cuya ubicación se mide con precisión durante un largo período de tiempo. El cálculo

ayuda a corregir las posiciones de la cámara de hasta 2 a 3 centímetros de precisión, tanto horizontal como vertical. (Pix4D, 2017, Drones RTK, párr. 1)

Figura 6

Enlace RTK con conexión sin interrupciones

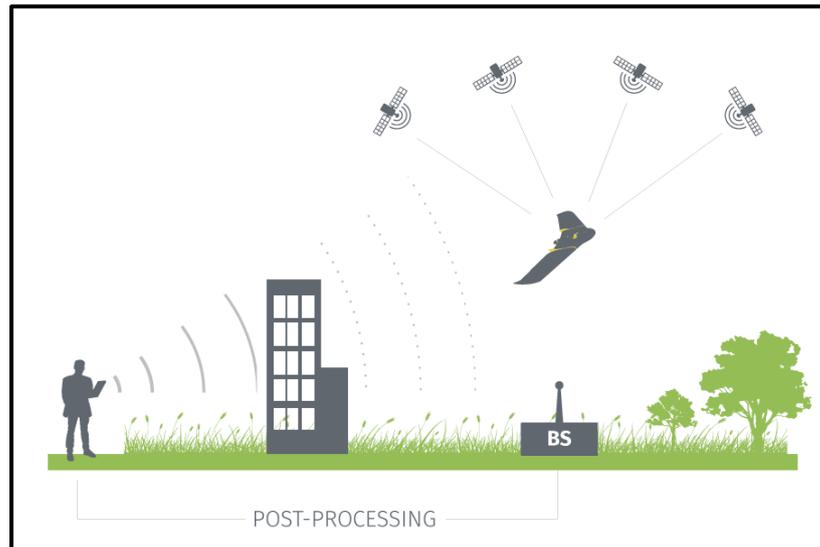


Nota: Recuperado de *Enlace RTK*, Pix4D, 2017, Pix4D (<https://www.pix4d.com>).

Sin embargo, las cosas no siempre funcionan a la perfección. Las personas que a menudo trabajan en el sitio pueden encontrar conexiones interrumpidas que interfieren las correcciones en tiempo real para las posiciones de la cámara. El sistema ofrece soluciones flotantes o incluso vuelve al modo independiente. Las posiciones de la cámara son flotación RTK, lo que indica una gran incertidumbre de las correcciones. La precisión volverá a ser de decenas de centímetros para RTK-float, o incluso hasta metros de precisión, como lo haría con los vuelos que no son RTK. En este caso, puede realizar el cálculo referente a la referencia de tierra después: cinemática post-procesada (PPK). (Pix4D, 2017, Drones RTK, párr. 2)

Figura 7

Enlace PPK con conexión interrumpida



Nota: Recuperado de Enlace PPK, Pix4D, 2017, Pix4D (<https://www.pix4d.com>).

Consideraciones Para el Vuelo del RPA.

GSD (Ground Sample Distance) – Resolución de Fotografía.

La distancia de muestreo del suelo (GSD) es la distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos en el suelo.

Por ejemplo, un GSD de 5 centímetros significa que un píxel en la imagen representa 5 centímetros lineales en el suelo. El mismo píxel puede cubrir 25 centímetros cuadrados (5 x 5 centímetros).

La distancia para la muestra del suelo se ve afectada por la altura del vuelo y las especificaciones de la cámara. Una altura más baja, con la misma cámara, significa una menor distancia para la muestra del suelo y resultados más detallados. (Pix4D, 2019, ¿Qué es la distancia de muestreo del suelo?, párr. 1-3)

Figura 8

Representación del GSD



Nota: Recuperado de *GSD*, Pix4D, 2019, Pix4D (<https://www.pix4d.com>).

Distancia Focal y Altura de Vuelo.

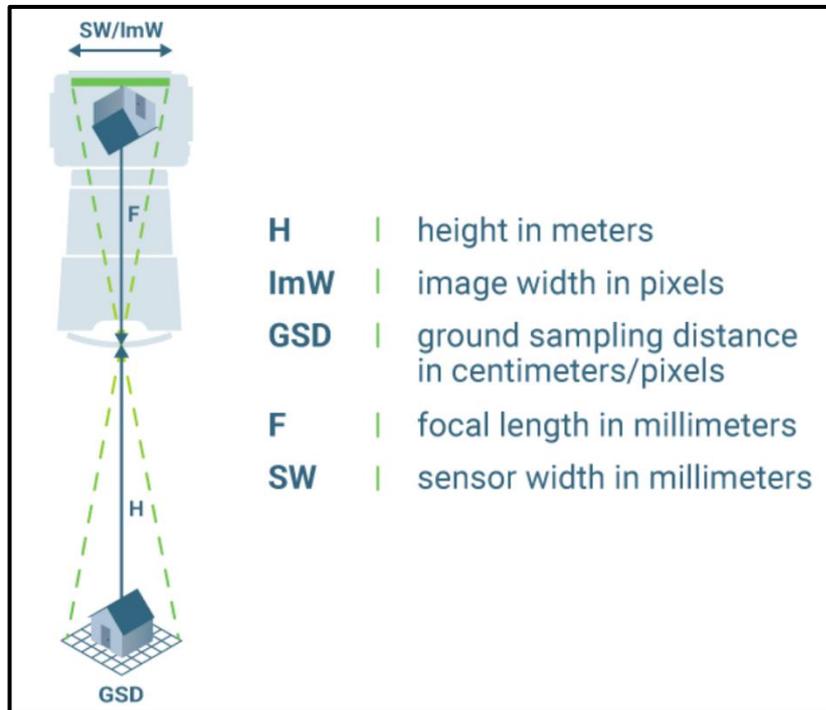
La distancia focal es la distancia visual en milímetros entre el sensor de la cámara y el punto del objetivo en el que convergen los rayos de luz. La distancia focal determina el ángulo de visión y el aumento. Un valor más pequeño (una distancia focal menor) supone un campo de visión más amplio y un menor aumento, por lo que la cámara puede captar una mayor parte de la escena. En fotogrametría la distancia focal suele ser fija. La distancia focal del objetivo determina el aumento y el campo de visión, es decir, la parte de la escena que se puede captar. (Mubanga, 2022, Distancia focal, párr. 1).

La altura de vuelo es la distancia desde el plano focal hasta la superficie del terreno

(H).

Figura 9

Representación de la distancia focal y la altura de vuelo



Nota: Recuperado de *Altura de Vuelo y GSD*, Pix4D, 2019, Pix4D (<https://www.pix4d.com>).

Dónde:

H: Altura de vuelo (m)

ImW: ancho de muestra captada (píxel)

F: lente focal (mm)

GSD: Distancia de muestreo del suelo (cm/píxel)

SW: ancho del sensor (mm)

Apertura de Cámara.

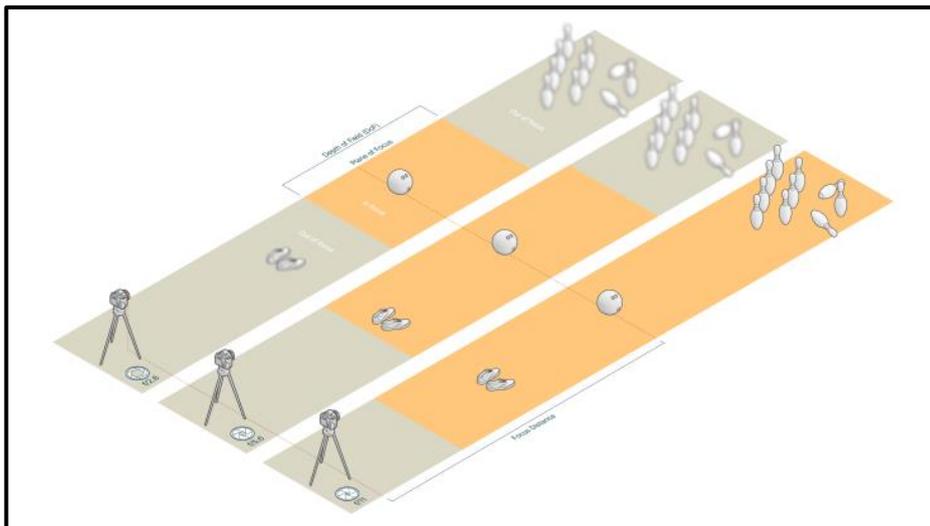
Se trata de un número, expresado en f-stops, que describe la amplitud con la que se abre el diafragma del objetivo para dejar entrar la luz en la cámara. Cada f-stop duplica la cantidad de luz que entra en la cámara. Aunque parezca raro, un valor grande, como f-32, indica una abertura pequeña, y un valor pequeño indica una abertura amplia.

La apertura determina directamente la profundidad de campo, es decir, qué parte de la escena está enfocada. Un diafragma amplio mantendrá enfocada una capa fina de la imagen y desenfocará el resto. Esto puede quedar bien, por ejemplo, en la fotografía de retratos, en la que se tiene un enfoque nítido en el sujeto y un fondo borroso. Este tipo de desenfoque se conoce como desenfoque focal.

Para la fotogrametría, hay que mantener enfocada la mayor parte posible de la escena. Las imágenes borrosas dificultan la unión de las imágenes. (Mubanga, 2022, Apertura, párr. 1-3)

Figura 10

Representación del área enfocada según la apertura de cámara



Nota: Recuperado de *Apertura de cámara*, Mubanga, 2022, Artec3D (<https://www.artec3d.com>).

Traslape u Overlap.

“Los traslapes también llamados porcentaje de recubrimiento estereoscópico, es la superposición o recubrimiento constante entre imágenes sucesivas y entre pasadas. Para vuelos fotogramétricos tradicionales y en condiciones ideales se recomiendan los recubrimientos siguientes:” (Claros, Guevara y Pacas, 2016, p. 95).

Tabla 1

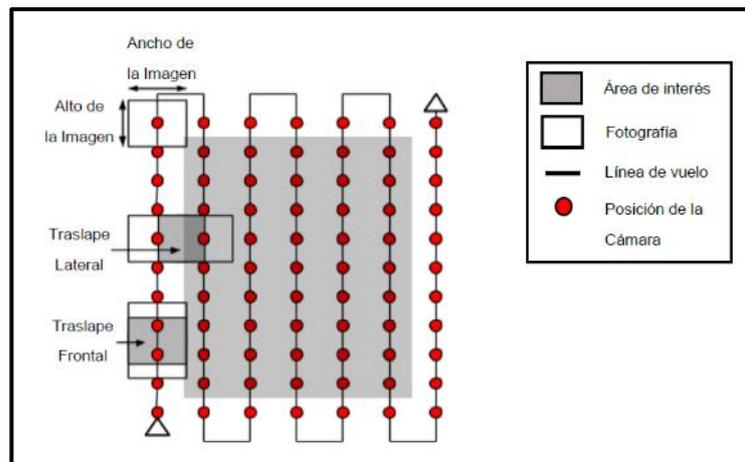
Traslape recomendado por tipo de terreno

Tipo de terreno	Traslape %	
	Longitudinal	Transversal
Llano	60	25
Ondulado	65 - 70	25 - 30
Montañoso	70 - 80	30 - 35

Nota: Esta tabla muestra los traslapes recomendados por tipo de terreno. Adaptado de Claros, Guevara y Pacas (2016)

Figura 11

Representación del traslape de fotografías en la trayectoria de vuelo



Nota: Adaptado de *Plan ideal de adquisición de la imagen- Caso general*, Pix4D, 2023, Pix4D (<https://support.pix4d.com>)

Puntos de Control Terrestre (PCT).

Los PCT son puntos de ajuste sobre la superficie que tienen una localización geográfica conocida, o coordenadas definidas, normalmente mediante un modelo

geoidal y coordenadas GPS. Al tener coordenadas conocidas seleccionadas y marcadas en terreno antes de recopilar cualquier dato.

Cada punto debe hacerse con colores de alto contraste que haga que destaquen sobre el terreno circundante; si son muy similares, será difícil encontrar los PCT en las fotografías. Además, los puntos deben tener un centro claramente definido que se alinee con la coordenada establecida. Esto se puede hacer con dos líneas perpendiculares. (DJI, 2021, ¿Qué son los puntos de control terrestre?, párr. 1-2).

La cantidad de puntos necesarios para crear un mapa de drones preciso varía según el tamaño de la zona y de la variedad del terreno. Los expertos suelen recomendar el uso de al menos cinco PCT, pero a veces se utilizan hasta 20. (DJI, 2021, ¿Cómo colocar los puntos de control terrestre?, párr. 1)

Los PCT, también pueden cumplir la función de puntos de control de calidad, estos no intervendrán en la georreferenciación de las fotografías.

Figura 12

Representación de punto control terrestre ubicado en terreno



Nota: Elaboración propia.

Receptor GPS Diferencial

Los equipos que se utilizan de las aplicaciones topográficas y geodésicas constan de los siguientes elementos:

- ANTENA GPS: Recibe y amplifica la señal recibida de los satélites.
- RECEPTOR GPS: Ordenador que decodifica la señal recibida por la antena y registra las observaciones
- TERMINAL: Es una interface de usuario que permite conocer el estado de la recepción, proceso de cálculo, y llevar a cabo la edición de los datos del receptor.

La antena es el elemento al cual viene siempre referido nuestro posicionamiento, está conectada a través de un preamplificador al receptor, directamente o mediante cable. La misión de la antena es la de convertir la energía electromagnética que recibe en corriente eléctrica que a su vez pasa al receptor.

El receptor GPS consta de una serie de elementos que se encargan de la recepción de las radiofrecuencias enviadas por los satélites. Además, suelen poseer diferentes canales para seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador interno con su correspondiente soporte lógico, una unidad de memoria para el almacenamiento de la información, teclado de control, pantalla de comunicación con el usuario, diferentes conectores para funciones varias y una fuente de alimentación interna o externa. (González, 2015, p. 24)

Receptor Trimble R12i GNSS.

Trimble R12i es una solución GNSS completa de alto rendimiento para obtener la máxima precisión y productividad en observaciones GNSS en tiempo real, incluso en situaciones de observación satelital compleja gracias a las tecnologías que

incorpora: motor de procesamiento Trimble ProPoint, y la compensación de inclinación Trimble TIP.

Trimble xFill: Tecnología que permite seguir midiendo pese a pérdida de conexión desde la fuente de correcciones diferenciales

Optimizado para el software de terreno Trimble Access 2021

Trimble RTX: Posicionamiento absoluto de precisión RTK sin necesidad de estación base

Trimble 360: 672 canales y rastreo de todas las constelaciones: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, entre otras. Protección contra interferencias y señales falsas.

Compatibilidad con múltiples controladores: TSC5, TDC600, T7, TSC7.
(GEOCOM, 2023, Trimble R12i GNSS, párr. 1-3)

Tabla 2

Precisión del receptor Trimble R12i GNSS

Levantamiento estático	
Estático de alta precisión	
Horizontal	3 mm + 0.1 ppm RMS
Vertical	3,5 mm + 0.4 ppm RMS
Estático y Estático Rápido	
Horizontal	3 mm + 0.5 ppm RMS
Vertical	5 mm + 0.5 ppm RMS
Levantamiento cinemático en tiempo real	
Línea base simple de menos de 30 km	
Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
RTK de red	

Horizontal	8 mm + 0.5 ppm RMS
Vertical	15 mm + 0.5 ppm RMS

Nota: Esta tabla muestra la precisión esperada del receptor GNSS R12i. Recuperado de (<https://es-la.geospatial.trimble.com>)

Figura 13

Receptor Trimble R12i GNSS



Nota: Adaptado de *Sistema GNSS Trimble R12i*, Trimble, 2021, Trimble (<https://es-la.geospatial.trimble.com>).

Métodos de Posicionamiento.

Método Estático Estándar.

Se trata del clásico posicionamiento para la medida de distancias con gran precisión (5mm + 1ppm) en el que dos o más receptores se estacionan y observan durante un periodo mínimo de media hora, una o dos (o más), según la redundancia y precisión necesarias, y en función de la configuración de la constelación local y distancia a

observar. Los resultados obtenidos pueden alcanzar precisiones muy altas, teóricamente hasta niveles milimétricos. Este método es el empleado para medir distancias mayores de 20 kilómetros con toda precisión. (González, 2015, p. 28)

Las aplicaciones de este método son:

- Redes geodésicas de cobertura a grandes áreas.
- Redes nacionales y continentales.
- Seguimientos de movimientos tectónicos.
- Redes de gran precisión.

Método Estático Rápido.

Es una variante del Método Estático Estándar. De esta forma se reducen los periodos de observación hasta 5 o 10 minutos por estación, manteniendo los mismos ordenes de precisión que para el método Estático (5mm-10mm + 1ppm).

Utiliza un algoritmo para la resolución estadística de las ambigüedades (en los equipos de la casa Leica, este algoritmo de resolución rápida de ambigüedades se denomina FARA), que permite la disminución de los tiempos de observación, por el contrario, tiene la limitación en las distancias a observar, menores de 20 kilómetros. El método destaca por su rapidez, sencillez y eficacia. (González, 2015, p. 28)

Las aplicaciones de este método son:

- Redes topográficas locales.
- Redes de control.
- Apoyo fotogramétrico.

Método Cinemático.

El receptor de referencia estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil (ROVER), deberá ser inicializado para resolver la ambigüedad, de una de las siguientes formas: mediante una observación en estático (rápido) o bien, partiendo de un punto con coordenadas conocidas. Las épocas o intervalos de cadencia de toma de datos será función del objetivo de trabajo (velocidad del movimiento, cantidad de puntos a levantar).

Existen mayores restricciones en la observación, ya que no puede haber pérdida de la ambigüedad calculada inicialmente. Si la hubiera tendríamos que volver a inicializar el receptor móvil.

Existe una variante de este método denominado STOP&GO. En este caso existe un número determinado de puntos a levantar, en los cuales realizaremos una parada durante unas épocas, almacenaremos la información del punto y seguiremos sin perder la señal de los satélites, hacia el siguiente punto a levantar. Este método ha quedado obsoleto en la actualidad debido a la aparición del RTK. (González, 2015, pp. 28-29)

Método en Tiempo Real - Real Time Kinematic (RTK).

Consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 ó 2 cm + 1ppm). Usualmente se aplica este método a posicionamientos cinemáticos, aunque también permite posicionamientos estáticos. Es un método diferencial o relativo. El receptor fijo o referencia estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil o “rover”, es el receptor en movimiento del cual se

determinarán las coordenadas en tiempo real (teniendo la opción de hacerlo en el sistema de referencia local). Precisa de transmisión por algún sistema de telecomunicaciones (vía radio-modem, GSM, GPRS, por satélite u otros) entre REFERENCIA y ROVER. Esta sería una restricción en la utilización de este método (dependencia del alcance de la transmisión). Sus aplicaciones son muchas en el mundo de la topografía, y van desde levantamientos, hasta replanteos en tiempo real, fundamentalmente. (González, 2015, p. 29)

Planificación de Vuelo

El plan de vuelo fotogramétrico consiste en parametrizar los datos técnicos específicos del proyecto según la precisión/escala deseada.

Los parámetros técnicos a tener en cuenta son los siguientes:

- Área del proyecto
- Tipo de drone
- Cámara de drone
- Trayectoria del drone
- Altura de vuelo
- GSD (Ground Sample Distance)
- % Traslapes

En la actualidad existen diversos softwares de planificación de vuelos según el tipo y marca de drone, por ejemplo: Pix4D, Drone Deploy, DJI GO, DJI PILOT, etc.

El plan de vuelo para nuestra investigación se realizó con el software DJI PILOT por ser compatible con el drone Matrice 300 RTK de la marca DJI.

Software de Procesamiento de Imágenes (Agisoft Metashape)

Al igual que los softwares de planeamiento de vuelo, actualmente existen varias opciones de softwares de procesamiento de imágenes, siendo uno de los más conocidos Agisoft Metashape.

Agisoft Metashape (anteriormente conocido como Agisoft Photoscan) es un programa de fotogrametría profesional que se utiliza a menudo para sistemas de información geográfica, documentación de patrimonio cultural, desarrollo de videojuegos y creación de efectos visuales. Es adecuado tanto para fotogrametría aérea como para fotogrametría de corto alcance.

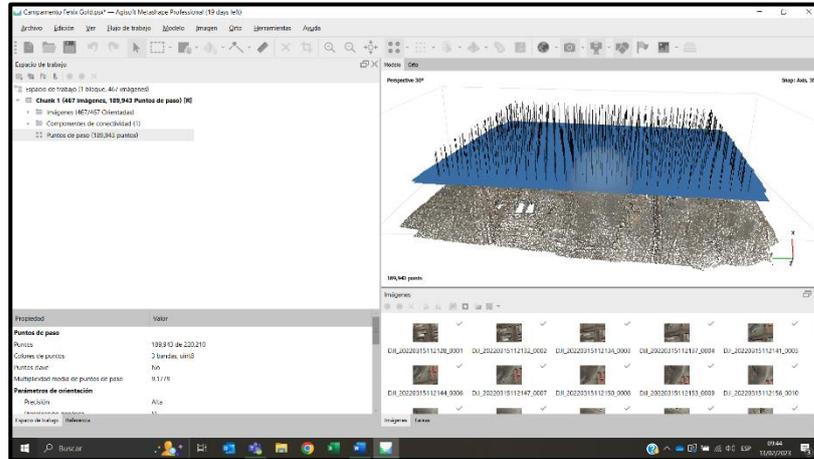
El programa cuenta con completas herramientas para editar la nube de puntos antes de generar una malla 3D, que incluyen clasificaciones automáticas de nubes de puntos para personalizar la reconstrucción de la geometría. Es decir, el software de fotogrametría puede distinguir entre diversos objetos como edificios y árboles, permitiéndote filtrarlos.

Metashape mejora el tiempo de procesamiento y la calidad de las capturas con respecto a las versiones anteriores del programa, utilizando datos generados por la comunidad para mejorar sus algoritmos y el aprendizaje automático. Con el tiempo, en teoría, seguirá mejorando cada vez más cuanto más lo usen sus usuarios.

Además, las numerosas herramientas de medición permiten a las empresas mineras, los topógrafos y otros profesionales llevar a cabo mediciones volumétricas. Entre las fascinantes características de Photoscan, encontramos la posibilidad de editar modelos 4D, lo que significa que se pueden grabar escenas completas en 3D y luego manipularlas. (Von, 2022, Agisoft Metashape, párr. 1-4)

Figura 14

Espacio de trabajo del software de procesamiento Agisoft Metashape



Nota: Elaboración propia.

Software de Diseño Civil (AutocadCivil 3D)

AutoCAD Civil 3D es un software o programa, el cual permite llevar a cabo procesos de diseño y de documentación, en cuanto diferentes proyectos de ingeniería civil, los cuales pueden resistir flujos de trabajo en términos de BIM, es decir Building Information Modeling por sus siglas en inglés o Modelado de información de construcción.

En este sentido, es un software que ofrece la posibilidad de hacer que los procesos tengan mayor coherencia, a generar respuestas más rápidas ante cualquier cambio y a ver el rendimiento de cada proyecto de mejor manera.

Cabe destacar, Civil 3D fue diseñado por Autodesk y todos los elementos se encuentran relacionados, esto permite que una vez se hagan modificaciones en los objetos, de forma automática el diseño cambia y los datos en cualquier tabla o perfil son calculados una vez más. Se trata de una gran ventaja, ya que de esta

manera es posible hacer cualquier cambio en un proyecto, sin tener que rehacerlo o empezar desde cero. (Autodesk, 2020, ¿Que es Autocad Civil 3d?, párr. 1-3)

Antecedentes

Antecedentes Internacionales

Sánchez (2017) en su tesis presentada en Manresa España, titulada “Uso y aplicaciones de drones en minería”, nos presenta las potenciales aplicaciones de los drones en minería según las necesidades específicas en el sector. Tales como prospección, topografía, control de operaciones, inspección técnica, prevención de riesgos laborales, control medioambiental, vigilancia, promoción audiovisual, servicios de emergencia y rescate. Así mismo, concluye:

La tecnología dron se encuentra en pleno auge y desarrollo, pues es de gran utilidad y tiene múltiples aplicaciones en el ámbito de la minería. Es por ello que recomienda difundir esta información a las empresas mineras y operadoras de drones para fomentar el uso de los drones en este campo. Gracias a ello, obtendremos una minería mucho más precisa, eficiente y sostenible ambientalmente. (p.3)

Silva (2020) en su artículo presentado en Chile, titulado “Aplicaciones de la fotogrametría aérea en minería: experiencias a partir del uso de drones”, nos da a conocer los conceptos, avances tecnológicos en equipos/ softwares y aplicaciones de la fotogrametría aérea actual en la minería chilena. Concluyendo:

La fotogrametría se ha transformado en una técnica altamente confiable para el mapeo de áreas extensas como son las que habitualmente se encuentran en la minería. La resolución espacial a la que llegan sus productos satisface

completamente la mayor parte de los requerimientos de precisión que ofrece el escenario minero, especialmente en los relacionados con movimiento de tierras. Así mismo, la gran ventaja de la fotogrametría es el gran nivel de representatividad que se obtiene en sus productos. En términos generales, las labores topográficas de representación que se requieren en la minería son sólo de control e inspección, es decir, la contrastación del diseño de ingeniería con la construcción. En este ámbito específico, la fotogrametría se consolida como una metodología altamente productiva y segura. (Conclusiones, párr. 1-4)

Antecedentes Nacionales

Paucar (2019) en su tesis titulada “Aplicación de fotogrametría digital de objeto cercano en infraestructura mina, proyecto minero Las Bambas – Apurímac”, tiene como objetivo fundamentar las posibilidades de implementar el uso de la fotogrametría en el área de infraestructura mina durante la ejecución de la unidad minera Las Bambas. La investigación determina alternativas para la obtención de mejores resultados referentes a la precisión y la calidad haciendo pruebas con distintas alturas de vuelo. Así mismo, analiza las consecuencias que tendrá el resultado final del proceso fotogramétrico variando la cantidad de puntos de control en tierra GCP (ground control point) y calcula la cantidad óptima necesaria de los mismos para obtener resultados con la precisión esperada. Además, estima la posibilidad de reducción en costos y tiempo de ejecución mediante el uso de la fotogrametría con drones en comparación al método tradicional realizado con GPS diferencial. Adicionalmente, enumera las consecuencias de la aplicación de la fotogrametría en cuanto a la seguridad laboral.

Finalmente, concluye:

Con una altura de vuelo constante de 80m y traslapes longitudinales y transversales de 75% y 60% respectivamente, se obtuvo una precisión de 2 cm. en X –Y y 6 cm. en Z. Así mismo, menciona que los puntos de control terrestres para un vuelo fotogramétrico son indispensables, y la fórmula empírica basada en el área y perímetro demuestra su efectividad. Además, en comparación de un levantamiento topográfico tradicional con GPS y la fotogrametría con drones, se logra reducir los tiempos de ejecución de 8 ha/día a 8 ha/ 25 – 30 minutos, siendo esta reducción una influencia directa en el costo. Así mismo, referente a la seguridad laboral, proyecta llegar a cero accidentes en la ejecución de la fotogrametría en grandes extensiones de terreno. (pp. 87-88)

Matías (2020) en su tesis titulada “Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en Minera Chinalco Perú S. A., Morococha 2020”, tiene como objetivo principal la implementación de un modelo tecnológico (DRON) a fin de mejorar los procesos productivos realizados en la minera Chinalco Perú S.A. La tesis se centró en analizar las características de distintos drones con el fin de identificar las posibles utilidades en la minería.

Sostiene que el uso de drones reduce los costos asociados a la operación minera, mejora los procesos de control en tiempo, efectividad y seguridad, pues para su ejecución se necesitaría menos personal y reduce la interrupción de labores en operación. Así mismo, afirma que los drones son una importante alternativa en la supervisión de obras por la seguridad laboral en las inaccesibles áreas de la minería. Finalmente, identifica una lista de las aplicaciones en minería tanto en los procesos productivos como en otras áreas, y son las siguientes: Prospección, topografía,

control de operaciones, inspección técnica, prevención de riesgos laborales, control medioambiental, vigilancia, promoción audiovisual, servicios de emergencia y rescate. (p.65)

Castro (2022) en su artículo titulado “Fotogrametría con drones aplicada a minería” tiene como objetivo dar a conocer los avances de la topografía adoptando nuevas técnicas e instrumentos enfocándose en las áreas de operaciones mina y proyectos/ingeniería. Nos da a conocer distintos Drones y softwares de procesamiento donde destacan los drones con sensores LIDAR para la minería subterránea y los drones con tecnología PPK y RTK los cuales reducen al mínimo los puntos de control terrestre.

Así mismo, sostiene que los drones (RPA/RPAS) han cobrado gran relevancia debido a que han encajado perfectamente en los dos objetivos clave de la minería: Seguridad y productividad. Además, menciona que los drones como el Matrice 300 RTK de DJI, el Wingtra one de Wingtra AG o el Ebee de Sensefly ofrecen la capacidad de levantar áreas extensas ya que cuentan con una mejor autonomía de batería y sensores de gran resolución que permiten volar a mayor altura manteniendo una buena resolución (GSD). (Operaciones mina, párr. 1)

Finalmente, con la fotogrametría se pueden lograr resultados de precisión igual de buenos, pero con el valor agregado de obtener mayor información que la data CSV (tabla de coordenadas) del método tradicional puesto que además de obtener las típicas curvas de nivel, tendremos una Ortofoto georreferenciada, un modelo 3D y una nube de puntos que brindará información de soporte a la toma de decisiones en Operaciones o Proyectos. (El factor clave, la precisión, párr. 1)

Formulación del Problema

Problema General

¿De qué manera la aplicación de la fotogrametría con RPA mejorará los tiempos en la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama - Chile?

Problema Específicos

- ¿De qué manera la aplicación de la fotogrametría con RPA mejorará los tiempos de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama - Chile?
- ¿De qué manera la aplicación de la fotogrametría con RPA mejorará la etapa constructiva de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama - Chile?

Objetivos

Objetivo General

Implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos en la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Objetivo Específicos

- Implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.
- Implementar la fotogrametría con RPA para mejorar la etapa constructiva de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Hipótesis

Hipótesis General

La implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Hipótesis Específicas

- La implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.
- La implementación de la fotogrametría con RPA mejora la etapa constructiva de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Justificación

De acuerdo con Solis (2004), “la supervisión de obra es un factor determinante en el éxito o el fracaso de un proyecto, pues un gran número de problemas en obras se atribuyen principalmente al mal desempeño de la supervisión” (p, 1). Así mismo, en el estudio de Torres, (2021), menciona que “los recorridos de revisión de la supervisión en obras de gran magnitud sobre pasan los tiempos estimados, por ende, no se puede realizar una supervisión constante para detectar problemas ni dar soluciones que aseguren el flujo continuo del proyecto” (p, 14).

La investigación planteada se justifica teóricamente por su aporte al conocimiento de nuevas tecnologías de soluciones a la supervisión de la ejecución de obras en el amplio campo de la ingeniería civil. Asimismo, La presente investigación se justifica desde el punto de vista práctico, por la capacidad de este tipo de drones para desarrollar trabajos en

regiones remotas, de difícil acceso o muy vegetadas, hace de ellos una herramienta de gran versatilidad para trabajos científicos.

Finalmente, la investigación se justifica metodológicamente por dar a conocer una nueva fuente de investigación para los profesionales de la ingeniería pudiendo optimizar sus métodos de supervisión de obras en minería en otras disciplinas como lo describe Sánchez (2017) mencionando las disciplinas dentro de la minería además de la supervisión de obras en donde se puede implementar el uso de drones; tales como, ‘prospección, control de operaciones, inspección técnica, prevención en riesgos laborales, control medioambiental, vigilancia, promoción audiovisual y servicios de emergencia y rescate’ (p. 3).

Limitaciones

La presente investigación presento como única limitación al clima, específicamente a la velocidad del viento, pues el RPA usado en los trabajos de campo, posee una resistencia máxima de viento de 15 m/s o 54 km/h; sin embargo, a partir de las 13 horas aproximadamente las ráfagas de viento superan los 50 km/h. Es por esto que los trabajos de fotogrametría se tuvieron que realizar entre las 9 y 12 horas.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Tipo de Investigación

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (p. 4).

Así mismo, sobre el alcance de la investigación, Hernández, Fernández y Baptista (2014), indican que:

Los estudios descriptivos consisten en describir fenómenos, situaciones, contextos y sucesos; esto es, detallar cómo son y se manifiestan. Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas. (p. 92)

Por lo tanto, este trabajo está basado sobre una investigación con enfoque cuantitativo con alcance descriptivo.

Diseño de la Investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2014, p. 152), afirman que un estudio no experimental Son “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos”.

Así mismo, el corte longitudinal o evolutiva se refiere a “estudios que recaban datos en diferentes puntos del tiempo, para realizar inferencias acerca de la evolución del problema de investigación o fenómeno, sus causas y sus efectos” (p. 159).

Por lo tanto, este trabajo está basado sobre una investigación del tipo no experimental de corte longitudinal o evolutiva.

Población y Muestra

Población

Todos los componentes mineros que tiene la unidad minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Muestra

De acuerdo con Bernal (2006, p. 165):

La muestra es la parte de la población que se selecciona, de la cual realmente se obtiene la información para el desarrollo del estudio y sobre la cual se efectuarán la medición y la observación de las variables objeto de estudio.

Para nuestra investigación la muestra será el campamento de la empresa minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Técnicas, Instrumentos y Procedimientos de Recolección de Datos

Según Bernal (2006, p. 174):

Un aspecto muy importante en el proceso de una investigación es el que tiene relación con la obtención de la información, pues de ello dependen la confiabilidad y validez del estudio. Obtener información confiable y válida requiere cuidado y

dedicación. Esta etapa de recolección de información en investigación se conoce también como trabajo de campo.

Estos datos o información que va a recolectarse son el medio a través del cual se prueban las hipótesis, se responden las preguntas de investigación y se logran los objetivos del estudio originados del problema de investigación. Los datos, entonces, deben ser confiables, es decir, deben ser pertinentes y suficientes, para lo cual es necesario definir las fuentes y técnicas adecuadas para su recolección.

La técnica que se utilizó en la presente investigación fue:

La Observación

“La observación es una técnica por medio del cual el hombre explora su entorno para luego plantear de manera adecuada la problemática a estudiar, prosiguiendo con una formulación de la investigación, incorporando programas, herramientas, y técnicas a utilizar” (Muñoz, 2015).

Documental

Según Muñoz (2015), “la técnica del análisis documental empleada fueron fuentes de información a través de recolección de datos escritos, guardada o recogida; recurriendo a tipos de documentos como: libros, periódicos, materiales grabados, imágenes, información estadística entre otras”.

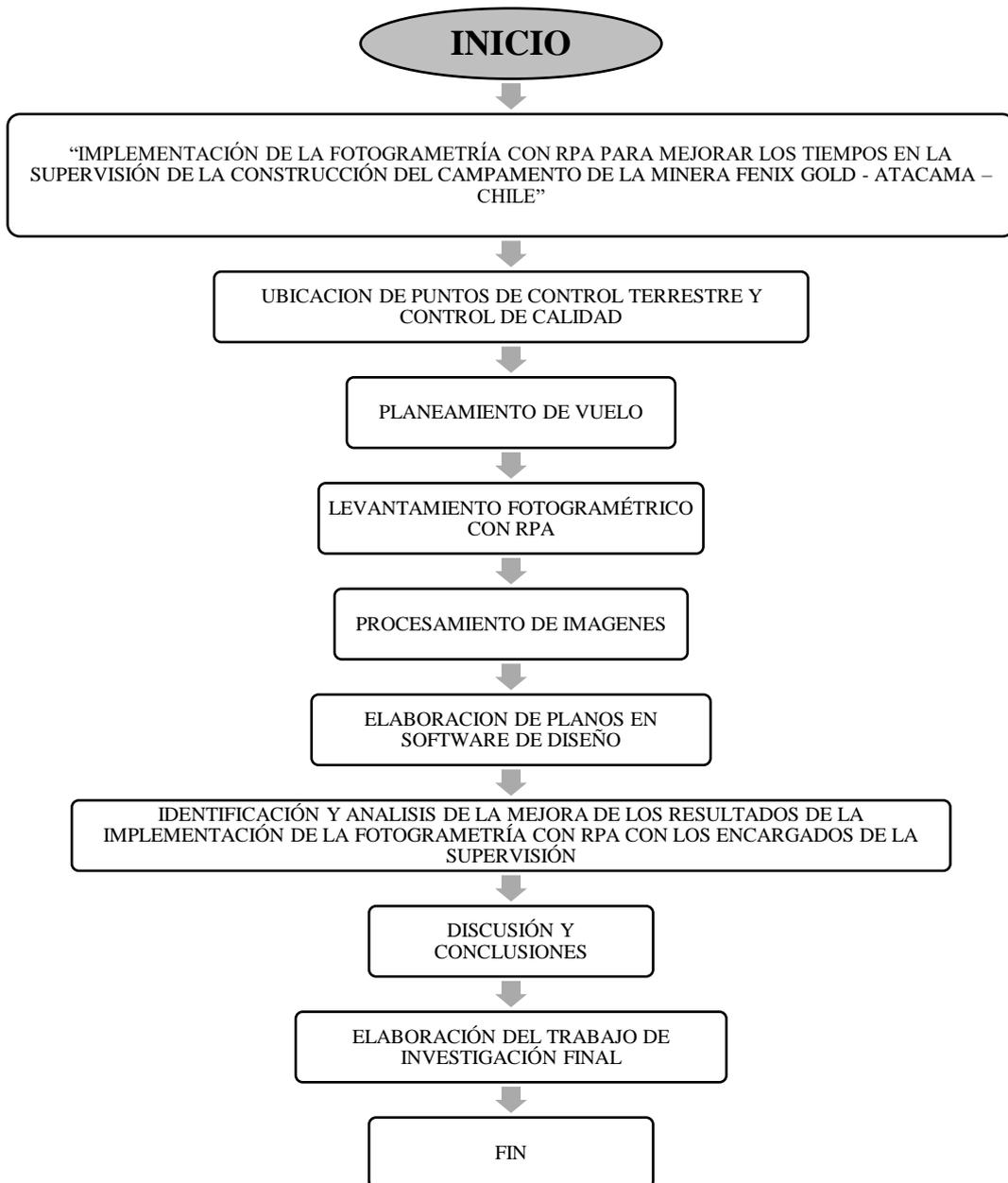
Se realizó la recopilación y se analizó la información existente, estos análisis se realizó en base a normas e información bibliográfica recopilada, las cuales son tesis, artículos, manuales, investigaciones realizadas por entidades privadas y públicas de acorde

al tema del estudio de RPA y la supervisión en minería, los cuales darán una buena base teórica en la realización de la investigación.

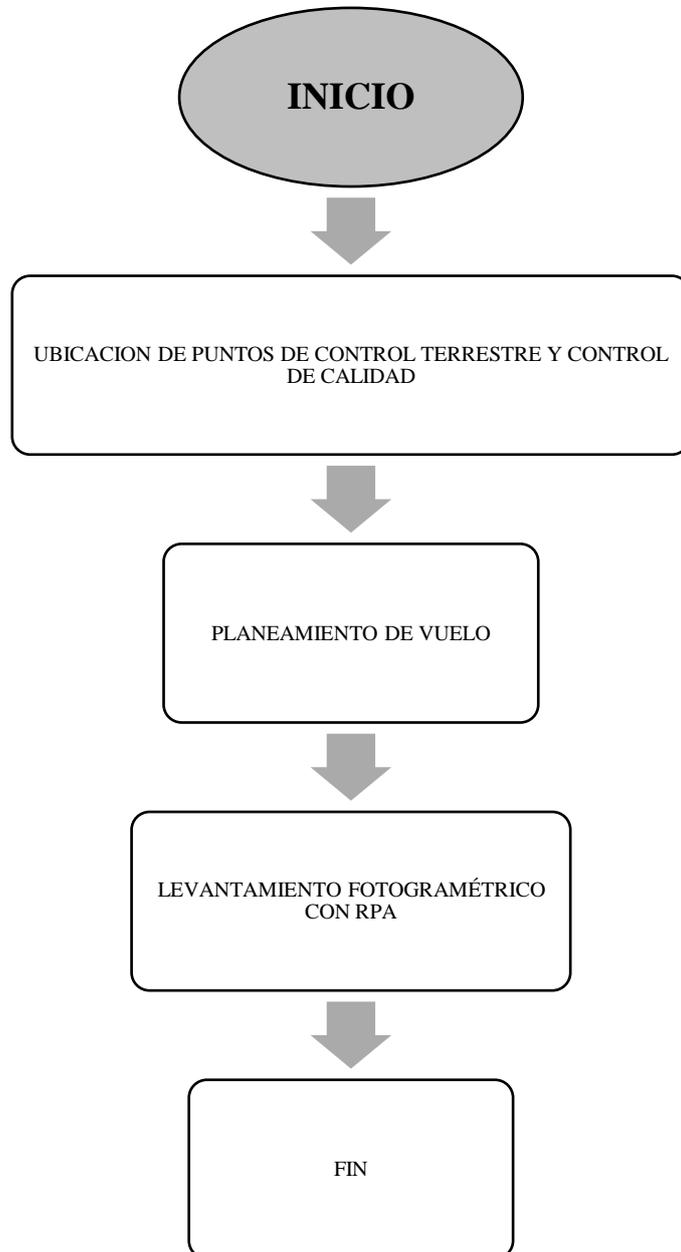
Instrumentos

- RPA (Drone) DJI Matrice 300 RTK
- Cámara DJI Zenmuse P1
- Receptor GNSS Trimble R12i
- Software de planeamiento de vuelo DJI Pilot
- Software de procesamiento Agisoft Metashape
- Software de diseño y presentación Autocad Civil 3D

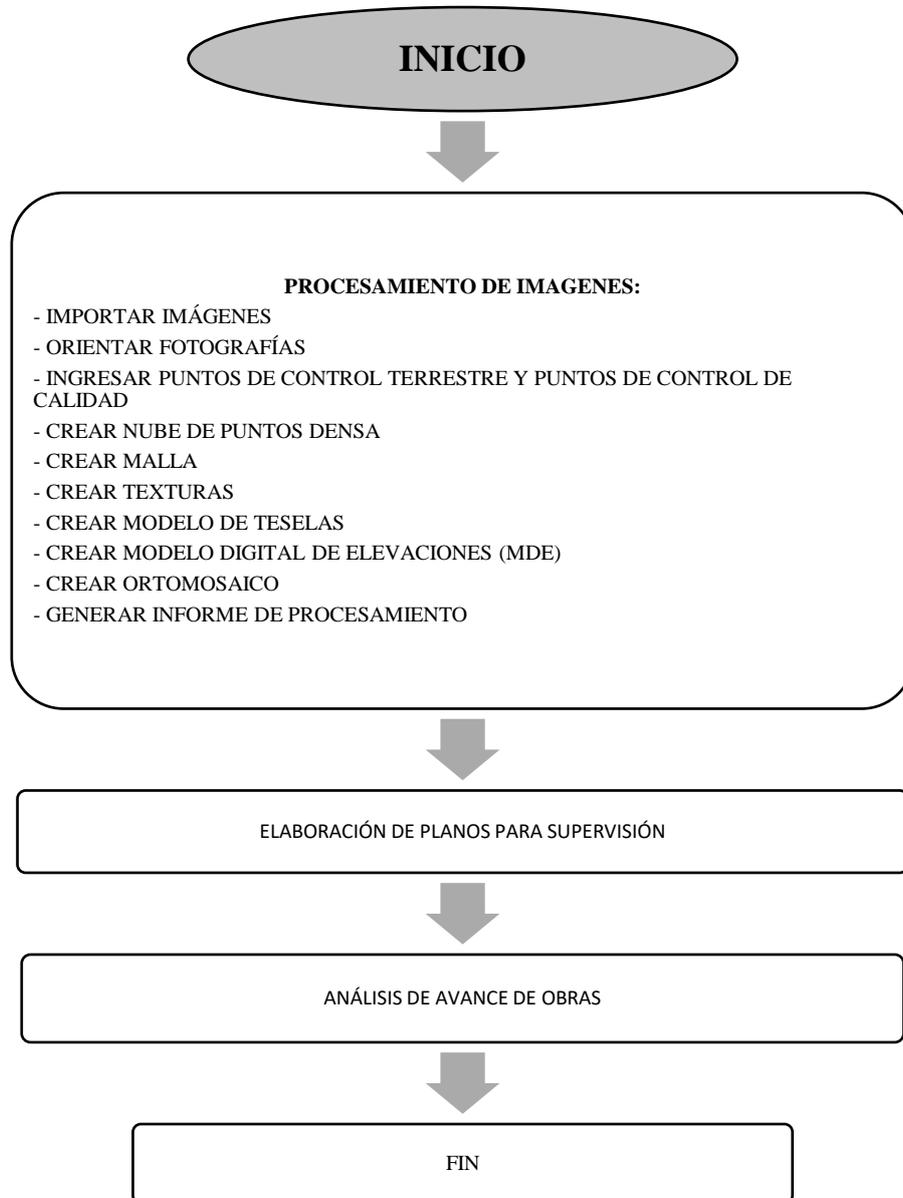
Procedimientos de Recolección de Datos - General



Procedimiento de Recolección de Datos - Fase de Campo



Procedimientos de Recolección de Datos - Fase de Gabinete



Aspectos Éticos

La presente investigación tomó en cuenta las consideraciones éticas como la responsabilidad en el cumplimiento de los protocolos de seguridad para los trabajos de campo. Así mismo, el respeto a la propiedad intelectual, pues en esta investigación se mencionan las fuentes ajenas que respaldan el trabajo; además, se cuenta con la aprobación

de la minera Fenix Gold para el tratamiento de los datos recabados en campo específicamente para la investigación.

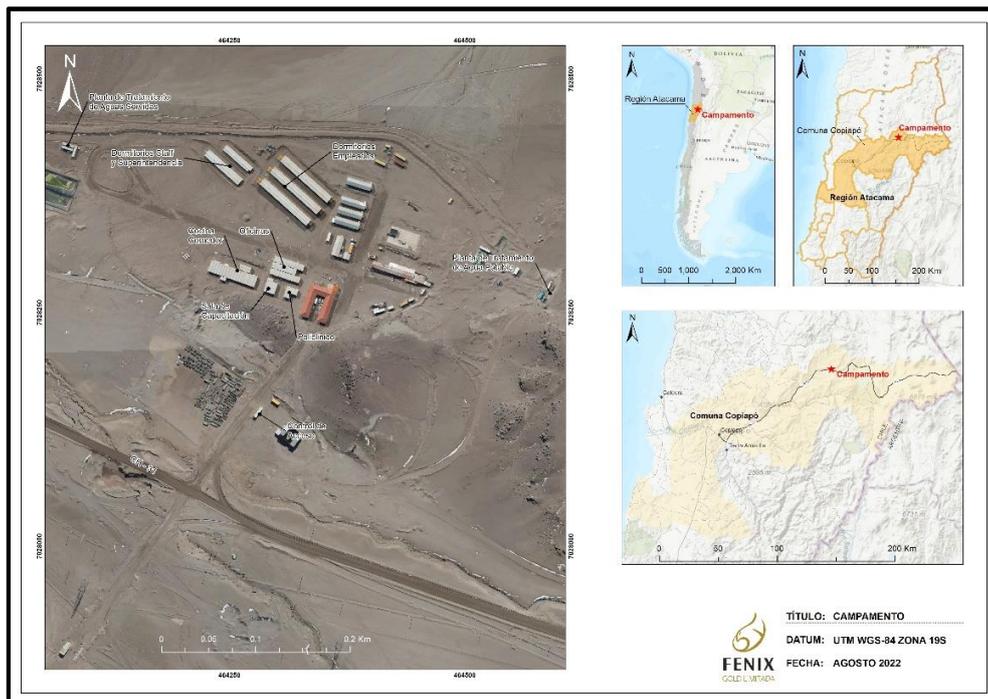
CAPÍTULO III: RESULTADOS

Ubicación del Área de Estudio

El proyecto se ubica en la Comuna de Copiapó, región de Atacama, Chile. El campamento se ubica a 130 km de la ciudad más cercana y a 25 km de los otros componentes mineros. El área de estudio es de 30 hectáreas aproximadamente, el terreno tiene una pendiente promedio de 10% y una altitud de 3,240 msnm.

Figura 15

Ubicación del área de estudio



Nota: Elaboración propia.

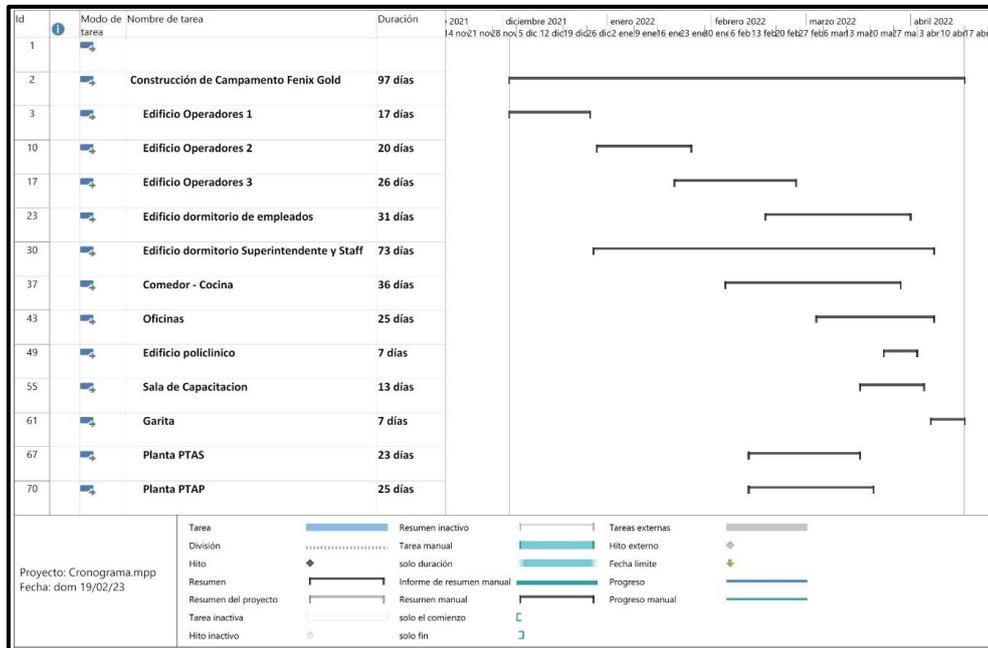
El campamento se construyó a partir del mes de diciembre de 2021 hasta abril del 2022, teniendo como entregables los siguientes módulos:

- Edificio de operadores 1

- Edificio de operadores 2
- Edificio de operadores 3
- Edificio dormitorio de empleados
- Edificio dormitorio superintendencia y staff
- Comedor – cocina
- Oficinas
- Edificio policlínico
- Sala de capacitación
- Garita
- Planta PTAS
- Planta PTAP

Figura 16

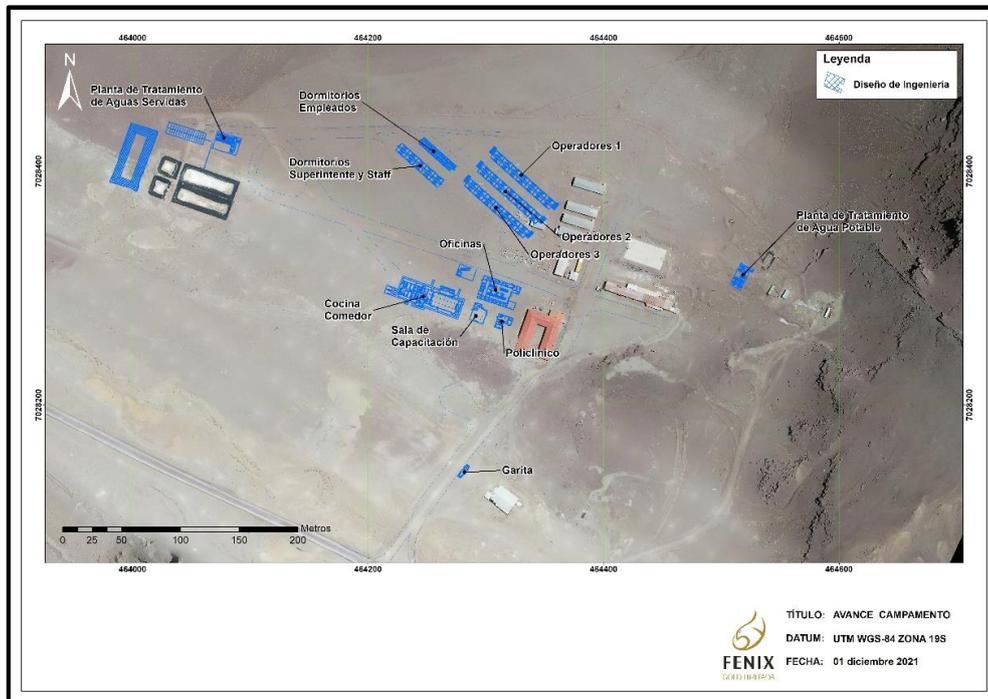
Cronograma de construcción de campamento



Nota: Elaboración propia.

Figura 17

Módulos de campamento proyectados



Nota: Elaboración propia.

Plan de Vuelo

El plan de vuelo se realizó en el software DJI PILOT, en donde se configuraron los datos técnicos como el área del levantamiento fotogramétrico, el tipo de drone, la trayectoria del vuelo, la inclinación de la cámara, la altura de vuelo, el % traslape y verificamos el GSD (Precisión) del levantamiento.

Tabla 3

Parámetros de configuración en el plan de vuelo

Parámetros	Datos
RPA (Drone)	DJI Matrice 300 RTK
Cámara	Zenmuse P1 48mp
Área del proyecto	30 ha
Altura de vuelo	119 m
Apertura de cámara	35 mm
GSD	1.47 cm/pix
Traslape transversal / longitudinal	70/80 %
Tiempo vuelo	30 min
Velocidad de vuelo	10 m/s – 36 km/h

Nota: Esta tabla muestra los parámetros de vuelo que serán configurados en el software de planeamiento de vuelo.

Figura 18

RPA (Drone) DJI Matrice 300 RTK



Nota: Elaboración propia.

Puntos de Control Terrestre

En el proyecto se ubicaron 5 puntos de control terrestre y 2 de control de calidad marcados en terreno con dianas de fácil reconocimiento. Sus coordenadas se obtuvieron mediante la medición de posicionamiento cinemático con GPS Trimble R12i partiendo de un punto base (PCT-LI01) con coordenadas conocidas.

Tabla 4

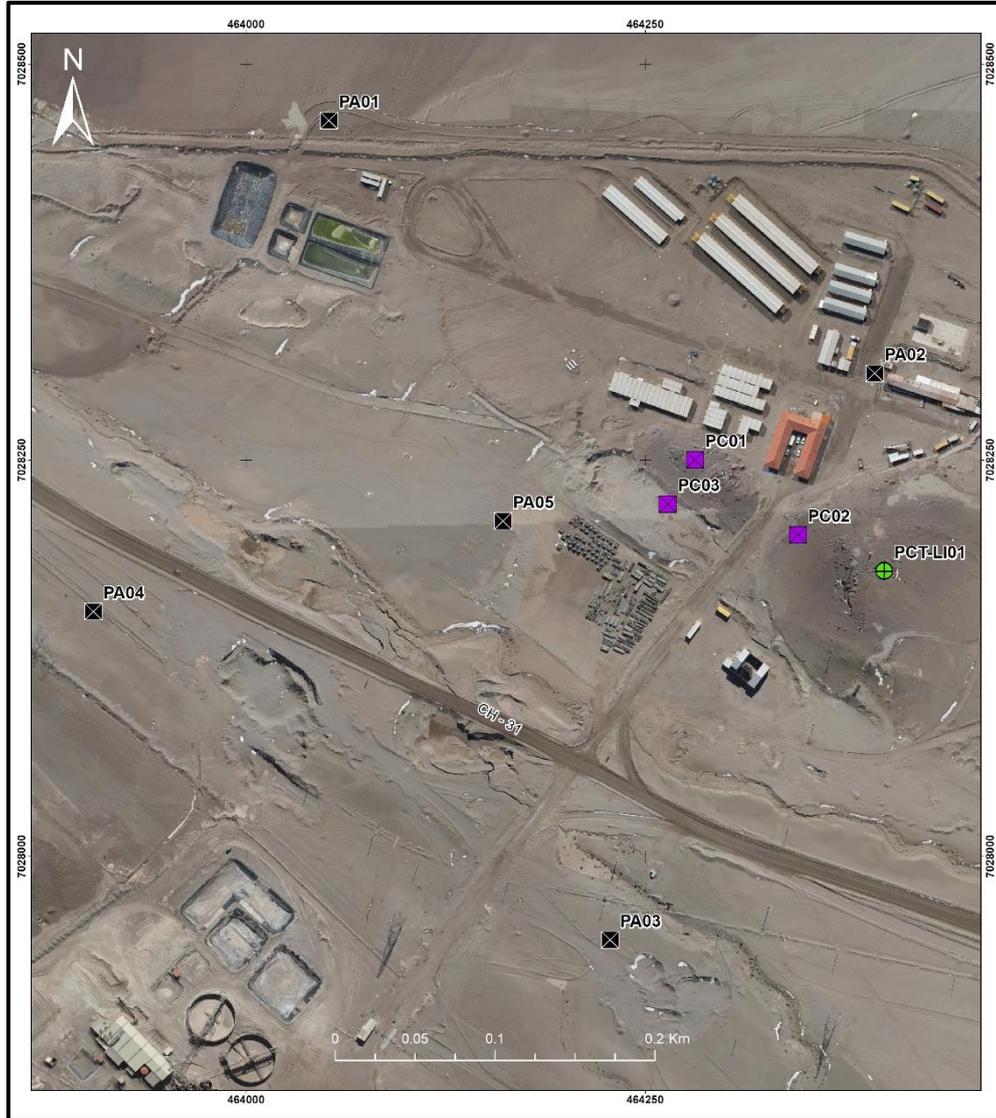
Coordenadas de puntos de control terrestre

Tipo	Código	Coordenadas UTM WGS84		Elevación (msnm)
		Este	Norte	
Puntos Control Terrestre	PA01	464051.909	7028464.862	3233.361
	PA02	464393.696	7028305.129	3244.252
	PA03	464228.061	7027947.595	3236.515
	PA04	463904.376	7028154.659	3223.889
	PA05	464160.946	7028211.799	3231.171
Puntos Control Calidad	PC01	464281.177	7028250.617	3244.962
	PC02	464345.616	7028203.197	3245.853
	PC03	464263.966	7028222.729	3236.308

Nota: Esta tabla muestra las coordenadas de los PCT y PCC ubicados y marcados en terreno.

Figura 19

Ubicación de puntos de control terrestre



Nota: Elaboración propia.

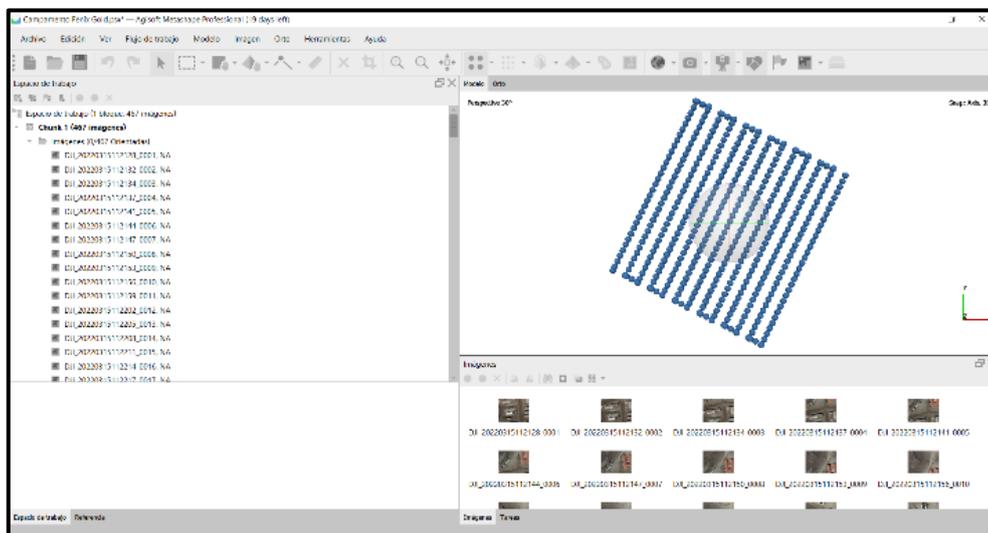
Procesamiento de Imágenes

Importar Imágenes

Para iniciar con el procesamiento de imágenes obtenidas mediante el RPA, importamos todas las imágenes, en este caso serán 387 fotos.

Figura 20

Ubicación de fotografías en la trayectoria de vuelo



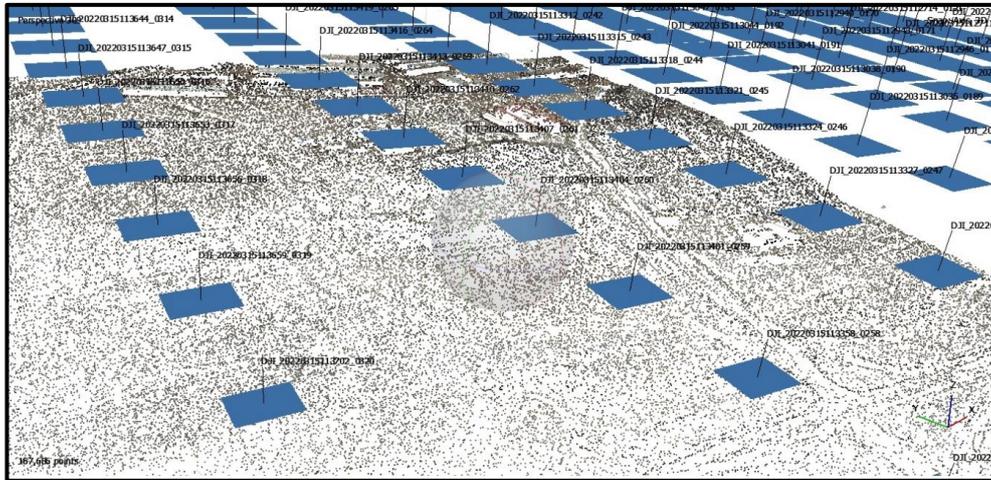
Nota: Elaboración propia.

Orientar Fotografías

Se realiza la georreferenciación de las fotografías según sus coordenadas obtenidas en el vuelo. Este paso se puede realizar más de una vez si existiera alguna foto que no logro orientarse. Se generará una nube de puntos dispersa o puntos de paso.

Figura 21

Fotografías orientadas con nube de puntos dispersa



Nota: Elaboración propia.

Ingresar Puntos de Control Terrestre y Puntos de Control de Calidad

La georreferenciación de las imágenes con los 5 puntos de control terrestre en el software consiste en cargar las coordenadas conocidas de los puntos de control terrestre que se midieron en campo con el GPS diferencial, y posteriormente ubicarlos en las fotografías, cabe mencionar que es muy importante materializar de buena manera las marcas de los puntos de control terrestre en campo.

Así mismo, para la georreferenciación se debe definir el sistema de coordenadas del proyecto, este sistema de coordenadas debe ser el mismo con el que se realizó el post proceso de los puntos de control y las coordenadas de las fotografías. En este caso el sistema de coordenadas será UTM WGS84 zona 19 sur.

Los puntos de control de calidad se ingresarán al software, pero no serán referenciados con las fotografías, pues estos servirán para la validación de la precisión de las coordenadas.

Figura 22

Ubicación de puntos de control terrestre y puntos de control de calidad



Nota: Elaboración propia.

Crear Nube de puntos Densa

Con las imágenes georreferenciadas, continuamos con la creación de la nube de puntos densa. Se crearán una gran cantidad de puntos de detalle.

Figura 23

Nube de puntos densa



Nota: Elaboración propia.

Crear malla

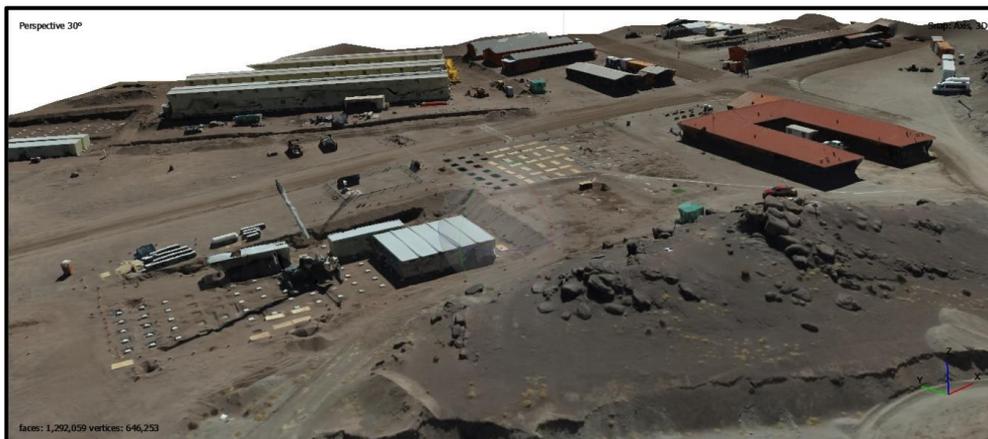
La generación de malla o malla poligonal, consiste en realizar una triangulación (Interpolación) con los puntos para generar un bloque 3D.

Crear Texturas

Las texturas se crearán en base a la malla generada anteriormente, esta consiste en rellenar los agujeros (espacios en blanco) del modelo con texturas de las imágenes alineadas.

Figura 24

Generación de texturas del proyecto



Nota: Elaboracion propia.

Crear Modelo de Teselas

El modelo de teselas se creará en base a la nube de puntos densa, la malla y las texturas corregidas. Este proceso permitirá la visualización del modelo 3D.

Figura 25

Modelo de teselas del proyecto



Nota: Elaboración propia.

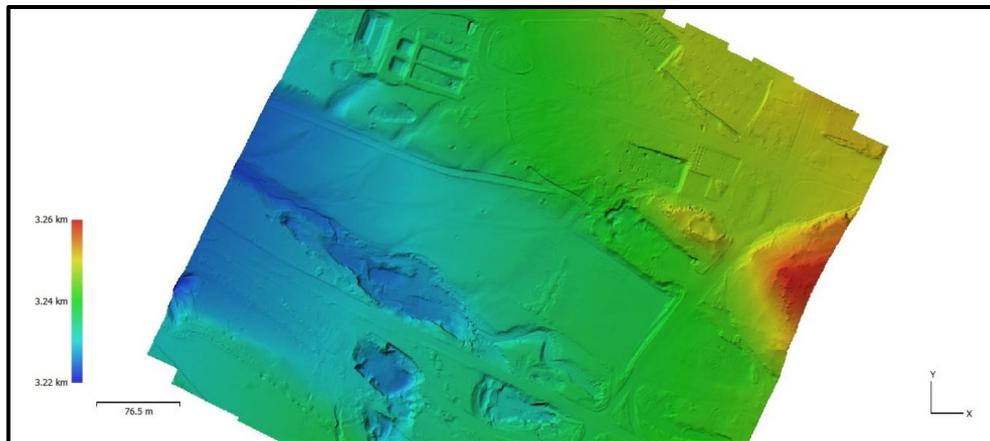
Crear Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El MDE se genera a partir de la nube de puntos densa. Con este modelo podemos identificar las cotas de todo el proyecto, así mismo, es la base para la generación de las curvas de nivel.

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno y que puede escribirse de forma genérica como $z = f(x, y)$. Este modelo permite la caracterización de las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2021, p. 8)

Figura 26

Modelo digital de elevaciones (MDE)



Nota: Elaboración propia.

Crear Ortomosaico

El ortomosaico es una imagen digital en la que se han corregido los desplazamientos de los puntos provocados por la inclinación de la toma y del relieve. Está referida a un sistema de proyección cartográfica, por lo que posee las características geográficas de cualquier producto cartográfico con la ventaja adicional de que los objetos están representados con su apariencia real. Está definida en función de una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal. (IGN, 2021, p. 9)

El ortomosaico es el producto final del procesamiento de imágenes, este producto se puede exportar en formatos compatibles con Autodesk, Arcgis, etc.

Figura 27

Ortomosaico del proyecto



Nota: Elaboración propia.

Generar Informe de Procesamiento

Culminado el procesamiento de imágenes y obtenido el MDE y el ortomosaico, es necesario generar el informe de procesamiento resultante, este nos permite respaldar la correcta aplicación de la metodología, pudiendo revisar los siguientes resultados:

- Datos del levantamiento, incluye el número de fotografías utilizadas, altura de vuelo, el GSD, el área cubierta por el vuelo y el error de proyección de las fotografías.
- Calibración de cámara, contiene los datos de la resolución, distancia focal y tamaño de pixel.
- Posiciones de cámara, muestra la ubicación de las fotos alineadas con el trayecto de vuelo y los errores en X, Y y Z de la georreferenciación de las fotos sin considerar lo PCT.
- Puntos de control terrestre, muestra la ubicación de los puntos y los errores en X, Y y Z del levantamiento luego de la georreferenciación de los PCT

- Características del MDE, nos presenta la resolución y la densidad de puntos por metro cuadrado del MDE
- Parámetros de procesamiento, muestra un resumen de los parámetros y tiempo utilizados en los procesos de procesamiento de imágenes.
- Sistema, muestra información del software y la computadora utilizada en el procesamiento de imágenes.

Tabla 5

Resumen de informe de procesamiento

Informe de Procesamiento	
Datos del levantamiento	
Número de fotos	387
Altura de vuelo	119 m
Área cubierta	30 ha
Error de re proyección de fotografías	0.401 pix
Calibración de cámara	
Resolución	8192 x 5460
Distancia focal	35 mm
Tamaño de pixel	4.39 x 4.39 micras
Posiciones de cámaras	
Error combinado	4.24036 cm
Puntos de control terrestre	
Error combinado	2.28725 cm
Modelo digital de elevaciones (MDE)	
Resolución	5.88 cm/pix
Densidad de puntos	289 puntos/ m2
Parámetros de procesamiento (Tiempos)	
Búsqueda de emparejamiento	3min 15seg
Orientación	2min 14seg
Mapas de profundidad	13min 16seg
Nube de puntos densa	21min 12seg
Insertar puntos de control	3min 30seg
MDE	1min 24seg
Ortomosaico	59min 40seg
TOTAL	1h 44min 31seg
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	2.0.0 build 15597

Sistema Operativo	Windows 64 bit
RAM	15.78 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i9-10885H CPU @ 2.40GHz
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics Quadro T1000 with Max-Q Design

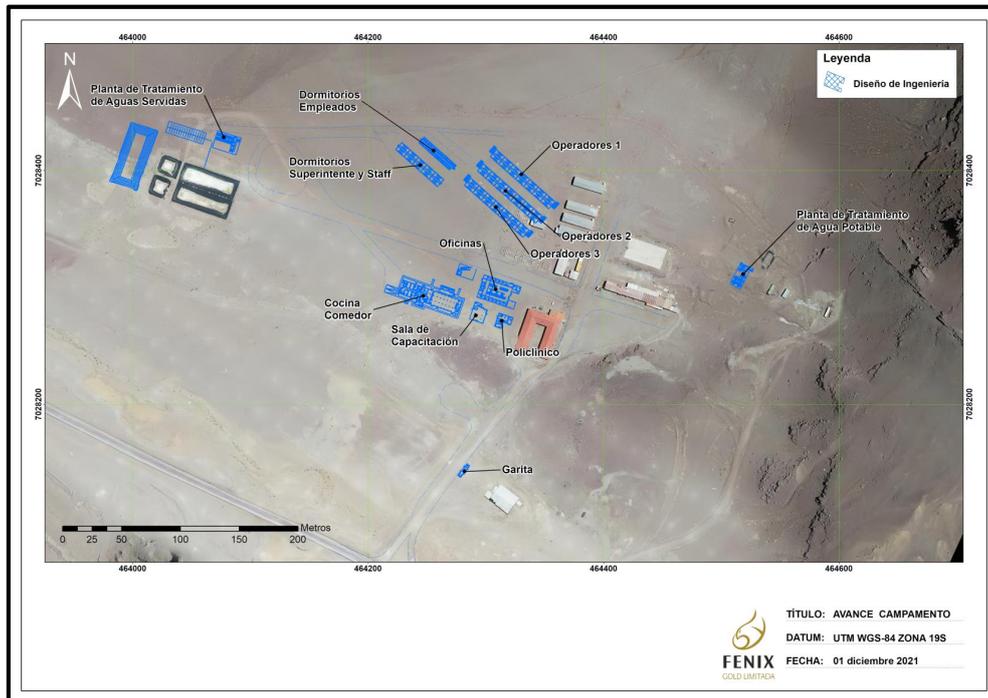
Nota: Esta tabla muestra en resumen los detalles del procesamiento de imágenes y resultados.

Elaboración de Planos para Supervisión.

Los planos para supervisión serán elaborados en el software Autocad Civil 3d. El ortomosaico del proyecto en sus distintas etapas de construcción serán contrastados con el diseño de ingeniería del campamento.

Figura 28

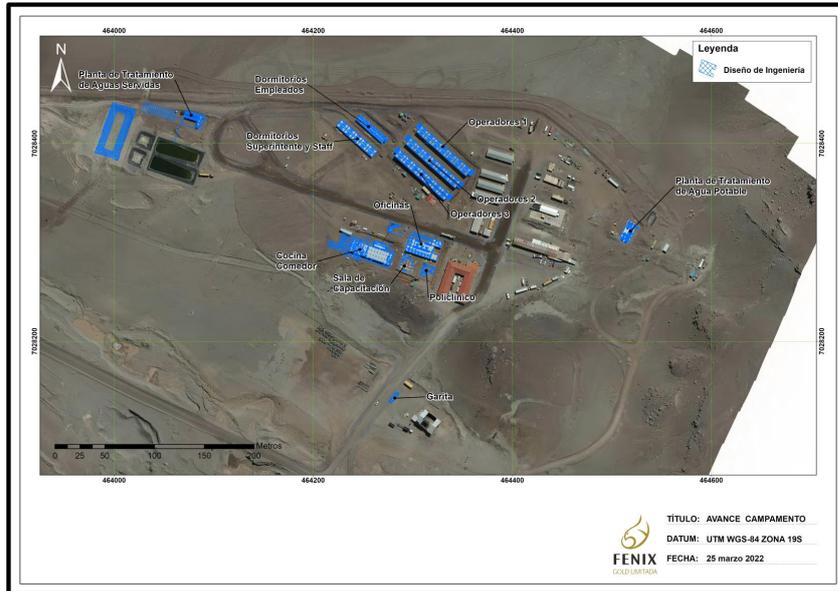
Avance de obras al 01 de diciembre del 2021



Nota: Elaboración propia.

Figura 29

Avance de obras al 25 de marzo del 2022



Nota: Elaboración propia.

Figura 30

Avance de obras al 01 de mayo del 2022



Nota: Elaboración propia.

Análisis de Avance de Obras

En general, los planos de avance de obras nos muestran el progreso escalonado de las partidas de tareas exteriores tales como; replanteo, trazados, excavaciones, rellenos de hormigón, montaje de fundaciones y montaje modular de la zona central del campamento conformados por la cocina-comedor, oficinas, sala de capacitación y policlínico. Así mismo, logramos la comprobación de los límites en área y perímetro de las coordenadas aprobadas en el permiso ambiental de cada componente del campamento.

En la figura 31 podemos observar el diseño de ingeniería proyectado sobre el terreno existente y en el área aprobada ambientalmente. Así mismo, en la figura 32 se muestra el cronograma de avance de obras.

Figura 31

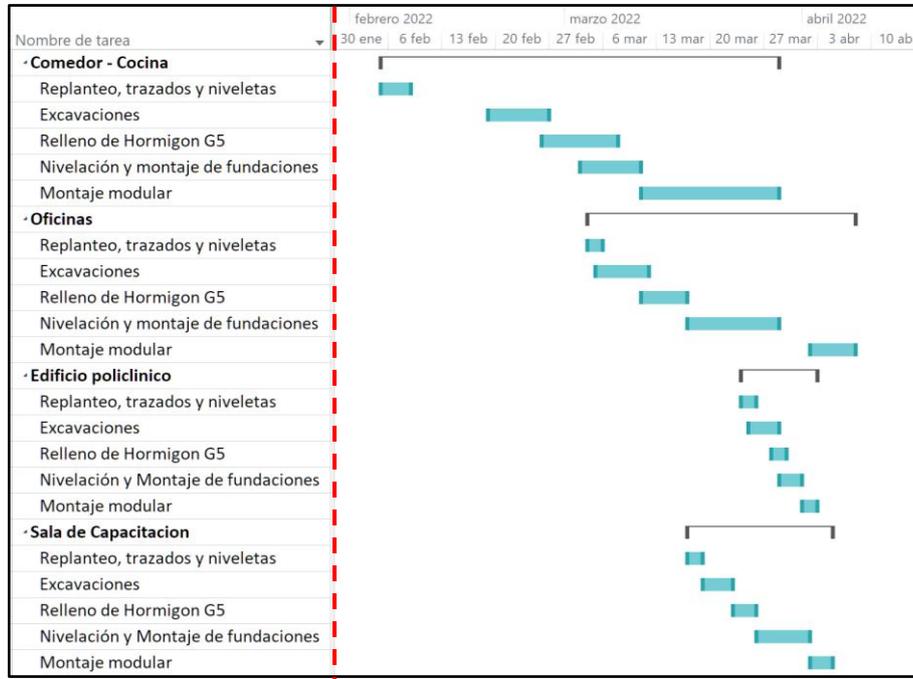
Plano de avance de obras al 01 de diciembre del 2021 – Zona central



Nota: Elaboración propia.

Figura 32

Cronograma de avance de obras al 01 de diciembre del 2021 – Zona central



Nota: Elaboración propia.

En la figura 33 y 34 observamos en plano y cronograma que la cocina - comedor se encuentra al 90% en la partida de montaje modular, las oficinas a 85% de la partida de montaje modular, la sala de capacitación al 100% en montaje de fundaciones y el policlínico al 0% de avance. Así mismo, se puede observar el cumplimiento de la construcción sobre el área de permiso ambiental aprobada.

Figura 33

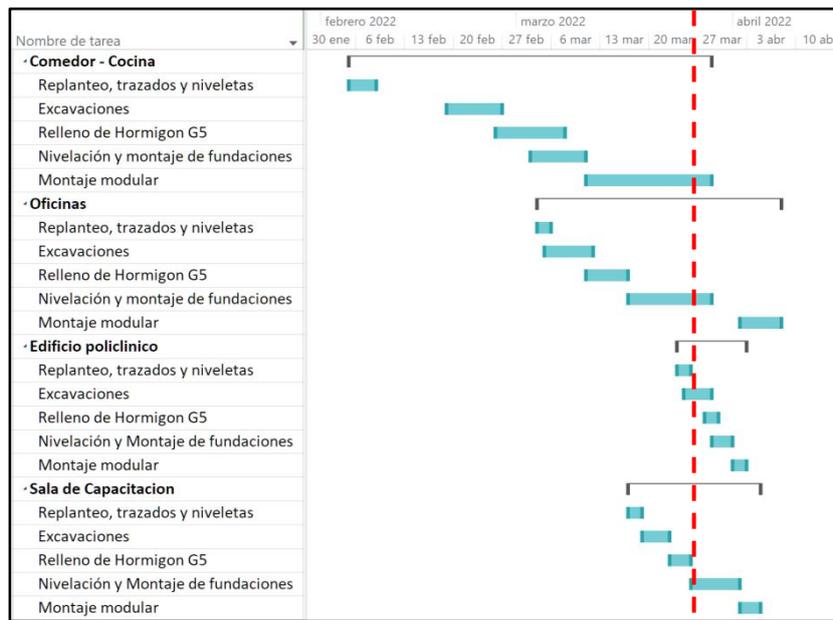
Avance de obras al 25 de marzo del 2022 – Zona central



Nota: Elaboración propia.

Figura 34

Cronograma de avance de obras al 25 de marzo del 2022 – Zona central



Nota: Elaboración propia.

En la figura 35 observamos que la cocina – comedor, las oficinas, la sala de capacitación y el policlínico se encuentran al 100% en la partida de montaje modular; además, se puede observar el cumplimiento de la totalidad de la construcción sobre el área de permiso ambiental aprobada.

Figura 35

Avance de obras al 01 de mayo del 2022 – Zona central



Nota: Elaboración propia.

En general, la optimización del detalle de la información de los ortomosaicos beneficia hasta en un 57% el tiempo de las tareas de supervisión tanto en el área de construcción y permisos como se muestra en la tabla 6.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión

Partir de los resultados de nuestra investigación, aceptamos la hipótesis general donde se confirma que la implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama-Chile.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen Matías (2020) y Silva (2020) quienes señalan que el uso de los RPAs son una importante alternativa en el control y supervisión de obras en minería por la confiabilidad y gran nivel de representatividad de la información en tiempo real.

Sin embargo, en nuestra investigación, es preciso especificar que los mejores resultados de la supervisión con RPAs se obtendrá solo en el avance de obras de las partidas externas o superficiales tales como: replanteo, trazados, excavaciones, rellenos de hormigón, montaje de fundaciones y montaje modular. Para las partidas de construcción interiores se recomienda el uso de las cámaras 360° o la tecnología láser.

Conclusiones

- Objetivo específico 1: Implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Con la optimización de los tiempos de trabajo de campo y gabinete invertidos en la obtención de los ortomosaicos se garantizó una supervisión dinámica que identifique posibles interferencias, tareas de re trabajo y tiempos muertos.

Con esto, se confirma nuestra hipótesis específica 1 que sostiene que la implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama- Chile.

- Objetivo específico 2: implementar la fotogrametría con RPA para mejorar la etapa constructiva de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile

Con los ortomosaicos obtenidos que se muestran en los planos se confirman la similitud de lo proyectado y aprobado con el avance de obras de las partidas de replanteo, trazados, excavaciones, rellenos de hormigón, montaje de fundaciones y montaje modular. Además, logramos la comprobación de los límites en área y perímetro de cada módulo del campamento aprobado en el permiso ambiental.

Así mismo, se confirma nuestra hipótesis específica 2 donde indicamos que la implementación de la fotogrametría con RPA mejora la etapa constructiva de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

- Objetivo general: implementar la fotogrametría con RPA para mejorar los tiempos en la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama – Chile.

Con los productos obtenidos se optimizaron los tiempos de supervisión del avance de obra desde el punto de vista constructivo y de permisos, garantizando la continuidad del proyecto como se muestra en la tabla 6.

Con esto, se confirma nuestra hipótesis general donde se sostiene que la implementación de la fotogrametría con RPA mejora los tiempos de la supervisión de la construcción del campamento de la minera Fenix Gold – Atacama- Chile.

Tabla 6

Comparación de tiempos utilizados en la supervisión

Supervisión con RPA		Supervisión sin RPA	
Tarea	Tiempo	Tarea	Tiempo
Vuelo	30min	Levantamiento topográfico con GNSS	6h
Procesamiento de imágenes	1h 45m		
Elaboración de planos	30min		
Revisión del área de construcción	30min	Revisión del área de construcción	1h
Revisión del área de permisos	30min	Revisión del área de permisos	1h
Total	3h 45min		8h

Nota: en esta tabla se muestra el detalle de los tiempos utilizados en la supervisión con RPA y sin RPA.

- Los 5 puntos de control terrestre optimizaron en 46% la precisión del ortomosaico.
- Para una supervisión planimetría se puede omitir los procesos de creación de mallas, texturas y modelo de teselas dentro del procesamiento de imágenes, pues las ortoimágenes se generan a partir de la nube de puntos densa.

Referencias

- Ag Eagle (2023). *Ebee X Series*. <https://ageagle.com/drones/ebee-x/>.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ASPRS (2014). *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*.
https://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Geospatial_Data_PE&RS.pdf.
- Autodesk. (11 de marzo de 2020). *¿Qué es Autocad Civil 3D?*.
<https://www.autodeskjournal.com/que-es-autocad-civil-3d/>
- Bernal Torres, C. (2006). *Metodología de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Pearson educación.
- Castro, F. [Frank Castro]. (24 de enero 2022). *Fotogrametría con drones aplicada a Minería*. LinkedIn. https://pe.linkedin.com/in/frank-castro-67080956?trk=pulse-article_main-author-card
- Claros Zelaya, R., Guevara Aguilar, A. & Pacas Cruz, N. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamiento topográfico mediante el uso de vehículos no tripulados*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de el Salvador].
<http://opac.fmoues.edu.sv/infolib/tesis/50108282.pdf>.
- DJI. (1 de noviembre de 2021). *Cómo optimizar la colocación de tus puntos de control terrestre*. <https://enterprise-insights.dji.com/es/blog/puntos-de-control-terrestre-drones#:~:text=Cada%20punto%20debe%20hacerse%20con,alinee%20con%20la%20coordenada%20establecida>.
- GEOCOM (2023). *Trimble R12i GNSS*. <https://www.geocom.cl/products/trimble-r12i-gnss>

- González Alcaraz, P. (2015). *Levantamiento mediante GPS de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la universidad en el mismo sistema de coordenadas*. [Tesis de Licenciatura, Universidad politécnica de Cartagena]. <http://hdl.handle.net/10317/4651>.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación (6.a ed.)*. McGraw-Hill.
- Instituto Geográfico Nacional IGN (2021). *Manual técnico para generación de ortoimágenes*, <https://app.ign.gob.pe/ortoimagenes/wp-content/uploads/2022/10/MT-N-3-01-1.pdf>
- Matías Ayma, F. (2020). *Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en Minera Chinalco Perú S. A., Morococha 2020*. [Tesis de Bachillerato, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8698>.
- Mubanga, K. (5 de mayo de 2022). *¿Qué es la fotogrametría?*. <https://www.artec3d.com/es/learning-center/what-is-photogrammetry>
- Muñoz Rocha, C. (2015). *Metodología de la investigación*.
- Paucar Hinojosa, A. (2019). *Aplicación de fotogrametría digital de objeto cercano en infraestructura mina, proyecto minero Las Bambas-Apurímac*. [Tesis de Licenciatura, Universidad nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/5088>.
- Pari Rendon, R. y Sedano Mendoza, F. (2019). *Análisis, desarrollo y comparación de un levantamiento fotogramétrico realizado con un RPA frente a un levantamiento topográfico convencional realizado con GNSS - mina Barrick, 2018*. [Tesis de

Licenciatura, Universidad privada del norte].

<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23460>

Pix4D. (26 de agosto de 2017). *¿Los drones RTK/PPK dan mejores resultados?*.

<https://www.pix4d.com/es/blog/los-drones-rtk-ppk-le-dan-mejores-resultados-que-el-uso-de-gcp/>

Pix4D. (25 de abril de 2019). *¿Qué es la precisión en un proyecto de mapeo aéreo?*.

<https://www.pix4d.com/es/blog/mapeo-aereo-de-precision/>.

Pix4D. (5 de febrero de 2023). *Paso 1 antes de iniciar un proyecto*.

<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>

Sánchez García, M. (2017). *Uso y aplicaciones de drones en minería*. [Trabajo final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña]. <http://hdl.handle.net/2117/112714>.

Silva, A. (13 de enero 2020). Aplicaciones de la fotogrametría aérea en minería: experiencias a partir del uso de drones. *GEOCOM*.

<https://www.geocom.cl/blogs/news/aplicaciones-de-la-fotogrametria-aerea-en-mineria-experiencias-a-partir-del-uso-de-drones>.

Solís Carcaño, R. (2004). La supervisión de obra. *Ingeniería*, 8(1), 55-60.

<https://www.redalyc.org/pdf/467/46780106.pdf>.

Stachniss, C. (2016). Photogrammetry I. [Diapositiva PowerPoint]. <https://www.ipb.uni-bonn.de/html/teaching/photo12-2021/2021-pho1-01-intro.pptx.pdf>.

Torres Ochoa, D. (2021). *Plan de implementación de drones como soporte de procesos BIM en control de avance de obra de infraestructura vial enfocado en las necesidades de los supervisores de obra*. [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/55039>.

Trimble (2021). *Sistema GNSS Trimble R12i*. https://es-la.geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2021-07/022516-481D-es-AR_Trimble%20R12%20GNSS%20Receiver_DS_A4_0721_LR.pdf.

Von Übel, M. (5 de diciembre de 2022). Los mejores programas de fotogrametría 3D de 2022. *ALL3DP*. <https://all3dp.com/es/1/mejores-programas-fotogrametria/>.

Wingtra (3 de febrero de 2023). *Drones para minería: Como usar y elegir el mejor*. <https://wingtra.com/es/drones-para-mineria/>

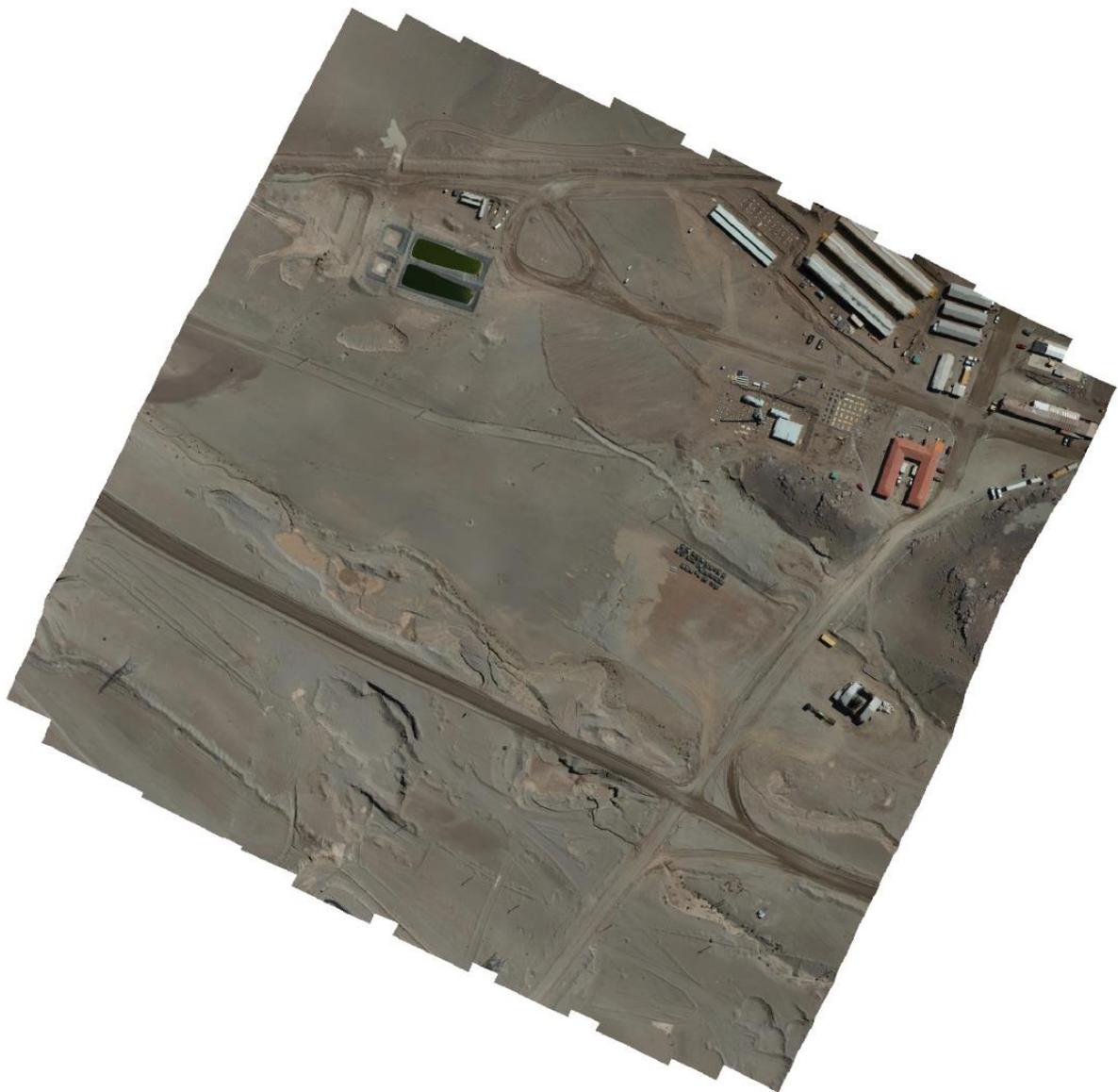
Anexos

Anexo N° 1: Informe de procesamiento

Campamento Fenix Gold

Processing Report

19 February 2023



Datos del levantamiento

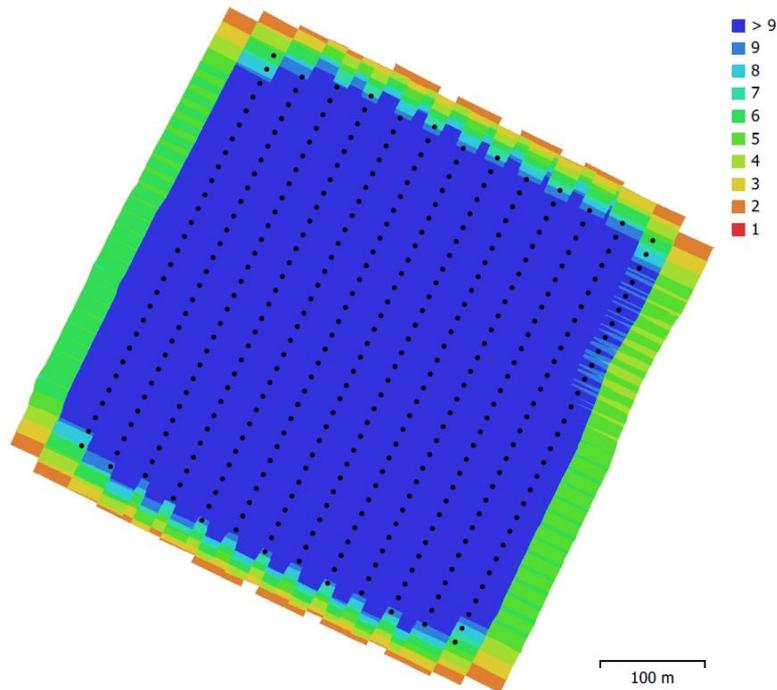


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes:	387	Imágenes alineadas:	387
Altitud media de vuelo:	119 m	Puntos de paso:	167,686
Resolución en terreno:	1.47 cm/pix	Proyecciones:	1,398,292
Área cubierta:	0.266 km ²	Error de reproyección:	0.404 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
ZenmuseP1 (35mm)	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

Calibración de cámara

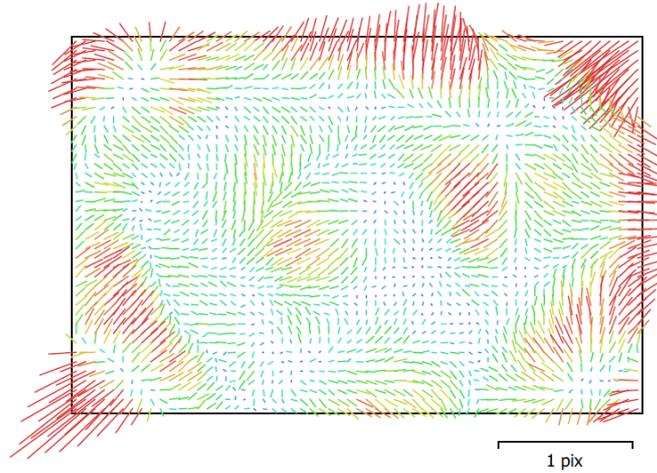


Fig. 2. Gráfico de residuales para ZenmuseP1 (35mm).

ZenmuseP1 (35mm)

387 imágenes

Tipo	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel
Cuadro	8192 x 5460	35 mm	4.39 x 4.39 micras

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	7929.01	2.4	1.00	-0.96	-0.53	-0.91	0.21	-0.75	0.10	0.93
Cx	-24.2713	0.073		1.00	0.52	0.88	-0.20	0.72	0.01	-0.89
Cy	51.9774	0.02			1.00	0.49	-0.11	0.40	-0.04	-0.43
K1	-0.0487812	3.2e-05				1.00	-0.57	0.93	-0.12	-0.84
K2	0.0136966	7.7e-05					1.00	-0.80	0.07	0.19
K3	-0.0810122	0.0002						1.00	-0.11	-0.69
P1	-0.00164237	5.4e-07							1.00	0.11
P2	0.00287101	1e-06								1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

Posiciones de cámaras

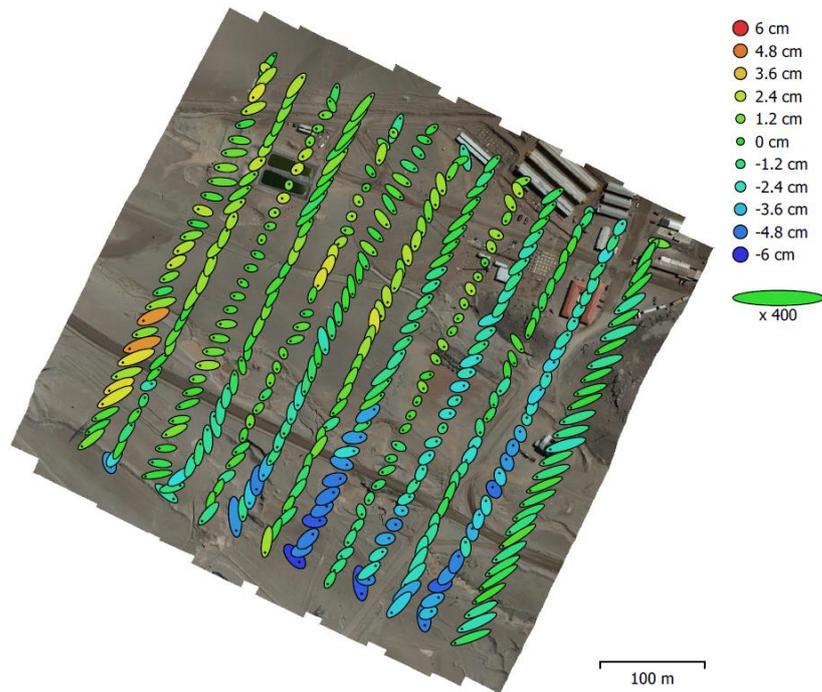


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Error combinado (cm)
2.75581	2.58757	1.92111	3.78021	4.24036

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.

X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Puntos de control terrestre

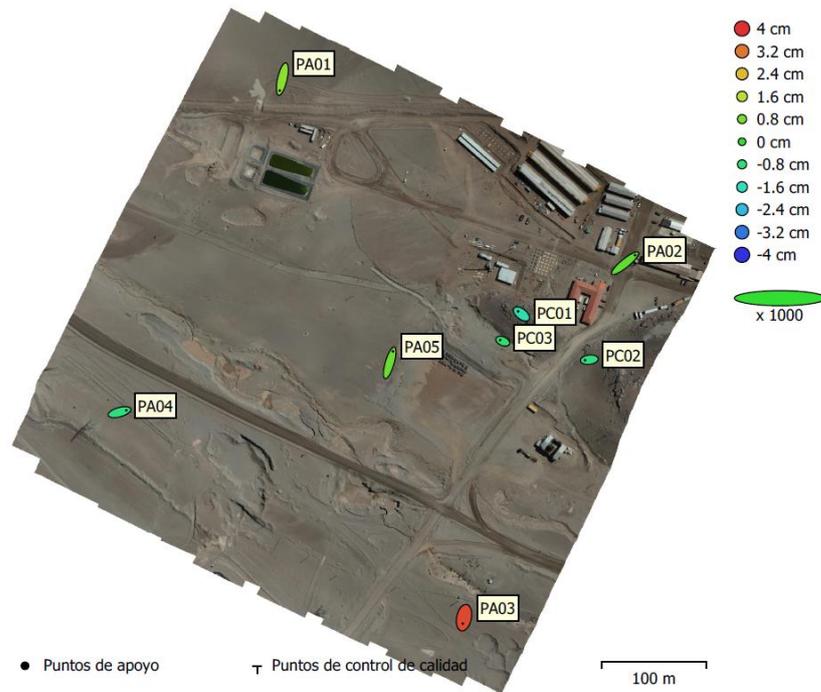


Fig. 4. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.
Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
8	0.966516	1.33957	1.58205	1.65185	2.28725

Tabla 4. ECM de puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
PA01	-0.507688	-2.24739	1.04086	2.52822	0.650 (15)
PA02	1.91377	1.57178	0.535218	2.53367	0.574 (10)
PA03	-0.230762	-1.15935	3.73523	3.91782	2.554 (9)
PA04	1.31177	0.370994	-0.929439	1.64992	0.524 (18)
PA05	0.648636	2.24436	0.645225	2.42367	0.452 (17)
PC01	-0.655486	0.510426	-1.43003	1.65384	0.539 (20)
PC02	-0.822503	-0.0982113	-0.939912	1.25283	0.672 (10)
PC03	-0.502073	0.212997	-0.701913	0.888891	0.438 (16)
Total	0.966516	1.33957	1.58205	2.28725	0.885

Tabla 5. Puntos de apoyo.
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Modelo digital de elevaciones

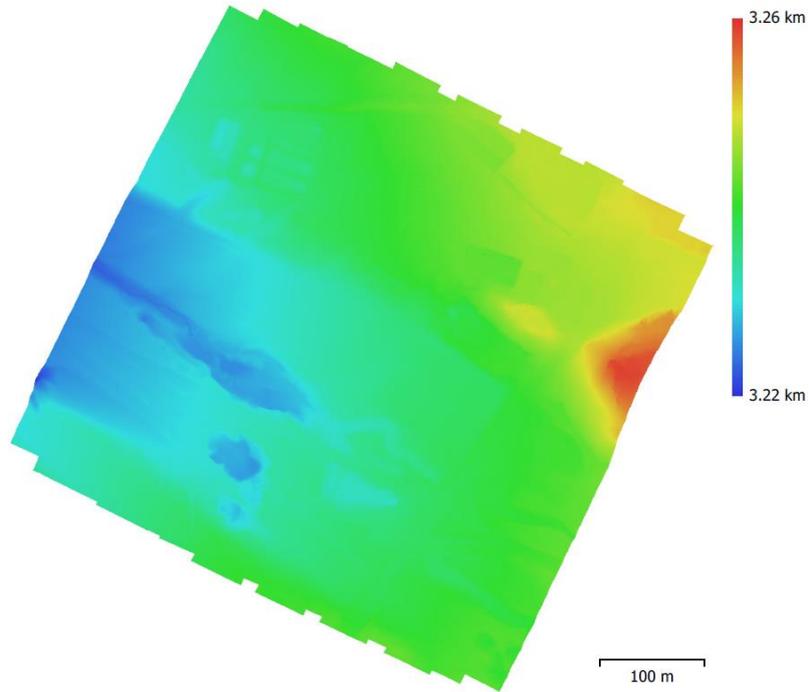


Fig. 5. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 5.88 cm/pix
Densidad de puntos: 289 puntos/m²

Parámetros de procesamiento

Generales

Cámaras	387
Cámaras orientadas	387
Marcadores	8
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo

Puntos de paso

Puntos	167,686 de 191,684
RMS error de reproyección	0.151877 (0.404205 pix)
Error de reproyección máximo	0.457625 (23.3239 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.60591 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	8.71877

Parámetros de orientación

Precisión	Alta
Preselección genérica	Sí
Preselección de referencia	Origen
Puntos clave por foto	40,000
Límite de puntos clave por megapixel	1,000
Puntos de paso por foto	4,000
Excluir puntos de paso inmóviles	Sí
Emparejamiento guiado	No
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	No
Tiempo búsqueda de emparejamientos	3 minutos 15 segundos
Uso de memoria durante el emparejamiento	561.92 MB
Tiempo de orientación	2 minutos 14 segundos
Uso de memoria durante el alineamiento	138.99 MB
Fecha de creación	2022:03:16 23:03:16
Versión del programa	1.8.1.13915
Tamaño de archivo	29.94 MB

Mapas de profundidad

Número	387
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	13 minutos 16 segundos
Uso de memoria	3.34 GB
Fecha de creación	2022:03:16 23:21:58
Versión del programa	1.8.1.13915
Tamaño de archivo	1.45 GB

Nube de puntos

Puntos	79,886,043
--------	------------

Atributos de los puntos

Posición	
Color	3 bandas, uint8
Normal	

Clases de puntos

Creado (nunca clasificado)	9,180,193
----------------------------	-----------

Terreno	70,682,025
Punto enterrado (ruido)	23,825
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	13 minutos 16 segundos
Uso de memoria	3.34 GB
Parámetros de generación de la nube de puntos	
Tiempo de procesamiento	21 minutos 12 segundos
Uso de memoria	6.97 GB
Parámetros de clasificación de puntos de terreno	
Ángulo máximo (deg)	7
Distancia máxima (m)	0.1
Tamaño de célula (m)	40
Tiempo de clasificación	3 minutos 30 segundos
Uso de memoria durante la clasificación	3.31 GB
Fecha de creación	2022:03:16 23:43:11
Versión del programa	1.8.1.13915
Tamaño de archivo	1.02 GB
Modelo	
Caras	1,292,059
Vértices	646,253
Colores de vértices	3 bandas, uint8
Textura	8,192 x 8,192, 4 bandas, uint8
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media
Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	13 minutos 16 segundos
Uso de memoria	3.34 GB
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Arbitrario
Origen de datos	Mapas de profundidad
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	15 minutos 43 segundos
Uso de memoria	6.40 GB
Parámetros de texturizado	
Modo de mapeado	Genérico
Modo de mezcla	Mosaico
Tamaño de textura	8,192
Habilitar el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de mapeado en UV	2 minutos 10 segundos
uso de memoria para mapa UV	2.72 GB
Tiempo de mezcla	11 minutos 49 segundos
Uso de memoria durante la mezcla	5.17 GB
Uso de memoria vídeo durante la mezcla	2.86 GB
Fecha de creación	2023:02:14 14:00:45
Versión del programa	2.0.0.15597
Tamaño de archivo	124.03 MB
Modelo de teselas	
Textura	3 bandas, uint8
Parámetros de obtención de mapas de profundidad	
Calidad	Media

Modo de filtrado	Agresivo
Límite máximo de redundancias	16
Tiempo de procesamiento	13 minutos 16 segundos
Uso de memoria	3.34 GB
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Mapas de profundidad
Tamaño de tesela	256
Número de caras	Media
Habilitar el filtro de efecto fantasma	No
Tiempo de procesamiento	2 horas 4 minutos
Uso de memoria	11.56 GB
Fecha de creación	2023:02:14 17:29:39
Versión del programa	2.0.0.15597
Tamaño de archivo	922.23 MB
MDE	
Tamaño	18,067 x 17,708
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
Parámetros de reconstrucción	
Origen de datos	Nube de puntos
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	1 minuto 24 segundos
Uso de memoria	316.81 MB
Fecha de creación	2022:03:17 00:22:10
Versión del programa	1.8.1.13915
Tamaño de archivo	226.93 MB
Ortomosaico	
Tamaño	46,075 x 45,331
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 19S (EPSG::32719)
Colores	3 bandas, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	MDE
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Habilitar el filtro de efecto fantasma	Sí
Tiempo de procesamiento	59 minutos 40 segundos
Uso de memoria	49.57 GB
Fecha de creación	2022:03:17 00:43:46
Versión del programa	1.8.1.13915
Tamaño de archivo	18.90 GB
Sistema	
Nombre del programa	Agisoft Metashape Professional
Versión del programa	2.0.0 build 15597
OS	Windows 64 bit
RAM	15.78 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i9-10885H CPU @ 2.40GHz
GPU(s)	Intel(R) UHD Graphics Quadro T1000 with Max-Q Design

Anexo N° 2: Planos

