

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Civil



ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA SUPERVISIÓN DE OBRA DE UNA EDIFICACIÓN POR FOTOGRAMETRÍA Y MODELO AS-BUILT

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Martin Alejandro Depaz Campoverde

Código 20142749

Hans Jhonny Paitanmala Nuñez

Código 20171129

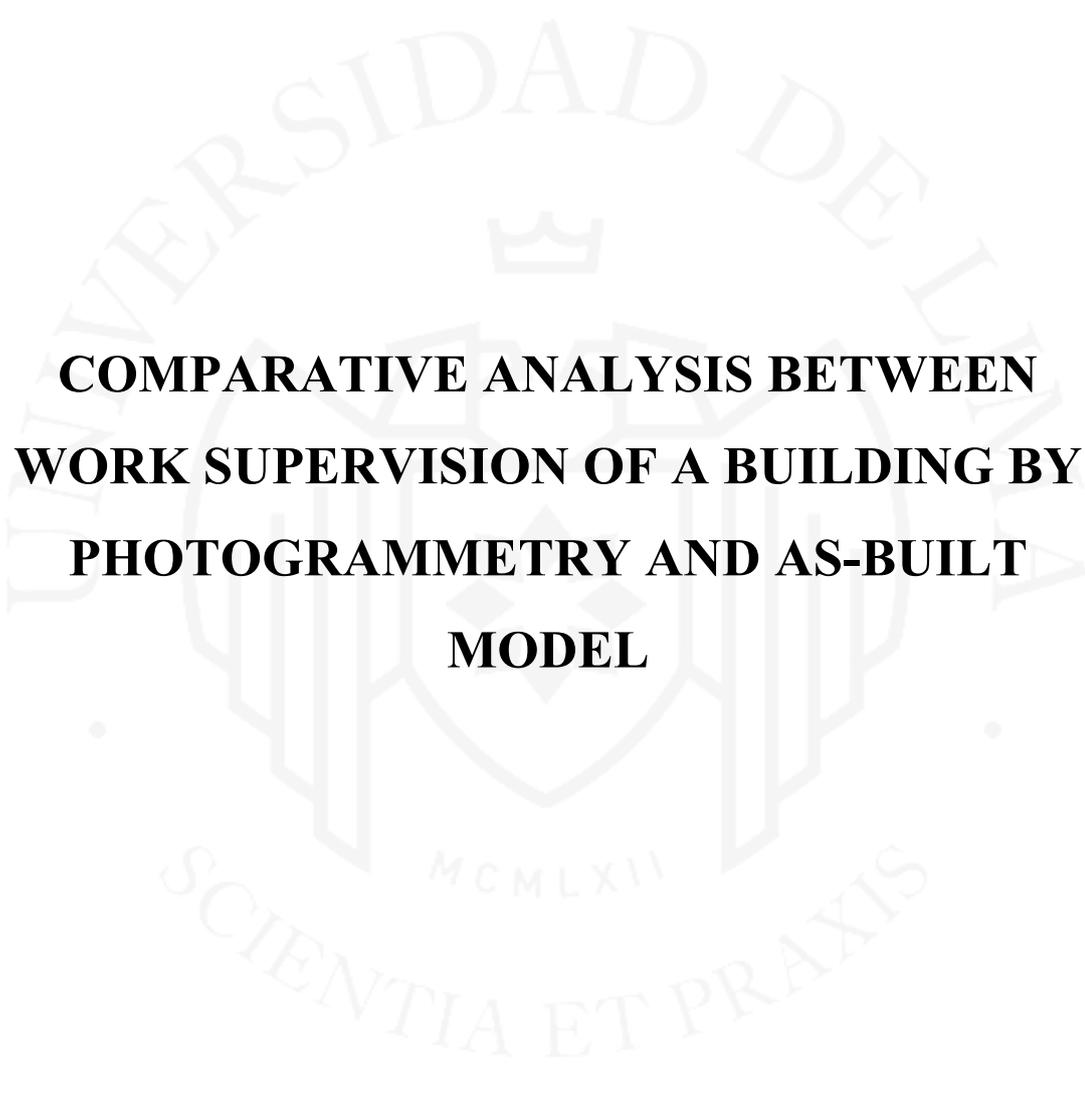
Asesor

Ana Felicita Luna Torres

Co-Asesor

Mónica Alejandra Vergara Olivera

Lima – Perú
Marzo de 2024



**COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN
WORK SUPERVISION OF A BUILDING BY
PHOTOGRAMMETRY AND AS-BUILT
MODEL**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema.....	1
Pregunta de investigación e hipótesis	2
Justificación	3
Objetivos.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE .4	4
1.1 Marco teórico – conceptual	4
1.1.1 BIM, modelado de la información de edificios.....	4
1.1.2 Fotogrametría	6
1.1.3 Fotogrametría aérea.....	7
1.1.4 Fotogrametría terrestre	7
1.1.5 Fotogrametría volumétrica	7
1.1.6 Modelo As-Built.....	9
1.1.7 Supervisión de obra.....	9
1.2 Estado del arte	9
1.2.1 Antecedentes	9
1.2.2 Casos de estudio	10
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO.....	15
2.1 Área de estudio.....	15
2.1.1 Ubicación	15
2.1.2 Tipo de estudio	16
2.1.3 Población y muestra	16
2.1.4 Diseño de recolección de datos	18
2.1.5 Instrumentos	19
2.1.6 Métricas.....	24
2.2 Impactos de la de tesis.....	24
CAPÍTULO III: RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	26

3.1	Recolección de datos - fotogrametría.....	26
3.2	Procesamiento de datos	29
3.2.1	Pix4D.....	30
3.2.2	ContextCapture (Bentley)	37
3.2.3	ReCap Autodesk.....	54
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	57
4.1	Resultados del software Pix4D	57
4.2	Resultados del software ContextCapture.....	59
4.3	Resultados entre el modelo As-Built y los softwares Pix4D y ContextCapture ...	61
4.4	Los aportes de esta investigación al ODS 9	66
	CONCLUSIONES	68
	RECOMENDACIONES	71
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	72
	ANEXOS.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 <i>Entornos favorables y desfavorables para el uso de fotogrametría</i>	7
Tabla 1.2 <i>Estado del arte - Desarrollo de nuevos métodos y tecnologías para realizar levantamientos y actualizaciones más precisas en obra generando mayor eficiencia y rentabilidad</i>	11
Tabla 2.3 <i>Cuadro de especificaciones técnicas del Mavic 2 Pro</i>	21
Tabla 2.4 <i>Cuadro de especificaciones técnicas del Phantom 4 Pro</i>	23
Tabla 2.5 <i>Contribución a los ODS</i>	25
Tabla 3.6 <i>Precisión de localización por punto de control (GCP) y errores medios</i>	35
Tabla 3.7 <i>Detalles de la densificación de la nube de puntos</i>	36
Tabla 3.8 <i>Detalles de Modelo de Superficie Digital (DSM), ortomosaico e índice</i>	37
Tabla 3.9 <i>Especificaciones generales de los procesamientos</i>	41
Tabla 3.10 <i>Nivel de precisión de los puntos de control del Primer Procesamiento</i>	42
Tabla 3.11 <i>Nivel de precisión de los puntos de control del Segundo Procesamiento</i>	42
Tabla 3.12 <i>Nivel de precisión de los puntos de control del Tercer Procesamiento</i>	43
Tabla 3.13 <i>Nivel de precisión de los puntos de control del Cuarto Procesamiento</i>	44
Tabla 3.14 <i>Nivel de precisión de los puntos de control del Quinto Procesamiento</i>	45
Tabla 4.15 <i>Resultados Pix4D</i>	58
Tabla 4.16 <i>Resultados ContextCapture</i>	60
Tabla 4.17 <i>Comparación de resultados de los softwares</i>	61
Tabla 4.18 <i>Coordenadas Elevación 1 – Modelo As-Built</i>	63
Tabla 4.19 <i>Coordenadas Elevación 2 – Modelo As-Built</i>	63
Tabla 4.20 <i>Coordenadas Elevación 1 – Nube de puntos Pix4D</i>	63
Tabla 4.21 <i>Coordenadas Elevación 2 – Nube de puntos Pix4D</i>	64

Tabla 4.22 <i>Coordenadas Elevación 1 – Nube de puntos ContextCapture</i>	64
Tabla 4.23 <i>Coordenadas Elevación 2 – Nube de puntos ContextCapture</i>	64
Tabla 4.24 <i>Errores en cada dirección – Nube de puntos Pix4D</i>	65
Tabla 4.25 <i>Errores en cada dirección – Nube de puntos ContextCapture</i>	65
Tabla 4.26 <i>Desviación estándar en cada dirección según software</i>	66
Tabla 4.27 <i>Oportunidades de replicación multilateral de los métodos y resiliencia de esta investigación a la meta 9.5 y 9.b del ODS 9</i>	67



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 <i>Muestra de extracción de datos</i>	6
Figura 1.2 <i>Visualización y navegación basadas en web del estado del trabajo en progreso en sitios de construcción</i>	8
Figura 2.3 <i>Ubicación del pabellón “F1” de la Universidad de Lima</i>	16
Figura 2.4 <i>Área de obra del pabellón “F1” de la Universidad de Lima</i>	17
Figura 2.5 <i>Diseño de recolección de datos</i>	19
Figura 2.6 <i>Dron Mavic 2 Pro</i>	20
Figura 2.7 <i>Dron Phantom 4 Pro</i>	22
Figura 3.8 <i>Vista en planta desde la posición inicial del recorrido</i>	26
Figura 3.9 <i>Fotografía DJI_0721</i>	27
Figura 3.10 <i>Fotografía DJI_0729</i>	28
Figura 3.11 <i>Fotografía DJI_0738</i>	28
Figura 3.12 <i>Modelo As-Built</i>	29
Figura 3.13 <i>Procesamiento mediante el software Pix4D</i>	30
Figura 3.14 <i>Ortomosaico y el Modelo de Superficie Digital (DSM) dispersa antes de la densificación</i>	31
Figura 3.15 <i>Desplazamiento entre las posiciones de la imagen inicial (puntos azules) y calculadas (puntos verdes), así como el desplazamiento entre las posiciones iniciales de los GCP (cruces azules) y sus posiciones calculadas (cruces verdes)</i> 32	
Figura 3.16 <i>Número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico</i>	33
Figura 3.17 <i>Coincidencias de puntos clave 2D</i>	34
Figura 3.18 <i>Procesamiento mediante el software ContextCapture (Bentley)</i>	40
Figura 3.19 <i>Ortomosaico del Quinto Procesamiento</i>	46

Figura 3.20 <i>Incertidumbres de las posiciones de las fotografías del Quinto Procesamiento</i>	47
Figura 3.21 <i>Distancia de posición a los metadatos del Quinto Procesamiento</i>	48
Figura 3.22 <i>Número de fotos viendo la escena del Quinto Procesamiento</i>	49
Figura 3.23 <i>Incertidumbres de posición del punto de enlace del Quinto Procesamiento</i>	50
Figura 3.24 <i>Número de observaciones por punto de enlace</i>	51
Figura 3.25 <i>Errores de reproyección por punto de enlace</i>	52
Figura 3.26 <i>Resolución del punto de enlace</i>	53
Figura 3.27 <i>Creación 3D de la nube de puntos de Pix4D con ReCap Autodesk</i>	55
Figura 3.28 <i>Creación 3D de la nube de puntos de Pix4D con ReCap Autodesk</i>	55
Figura 3.29 <i>Creación 3D de la nube de puntos de ContextCapture con ReCap Autodesk</i>	56
Figura 4.30 <i>Elevación 1 del Pabellón “F1” de la Universidad de Lima</i>	62
Figura 4.31 <i>Elevación 2 del Pabellón “F1” de la Universidad de Lima</i>	62

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Informe del asesor.....	79
----------------------------------	----



RESUMEN

Al momento de realizar una supervisión de obra es usual pedir actualizaciones o levantamientos para obtener los datos de la situación actual de la misma, que por lo general se realizan mediante métodos tradicionales, generando retrabajos que requieren mucho tiempo y ocasionando un aumento de los costos (Ibaceta, 2018). Por ello, se realizará una comparación entre el uso de fotogrametría y el modelo tradicional, utilizándose como guía un modelo As-Built, el cual se generará a través de levantamientos topográficos tradicionales que son plasmados en las actualizaciones As-Built con la última información a través de modelos 3D y planos 2D. La presente tesis tiene como objetivo comparar los resultados obtenidos en la supervisión de obra de una edificación por fotogrametría y compararlo con el modelo As-Built. Además, se compararán los procesamientos de datos realizados en dos softwares fotogramétricos para definir la precisión que se puede obtener como resultado del uso de esta nueva tecnología. Se observó que, en todas las comparaciones realizadas, el software ContextCapture posee mayor precisión que Pix4D. Asimismo, basándonos en los resultados de los Quality Reports ambos softwares cumplen la precisión necesaria para una supervisión de obra en una edificación. Mientras que, en la comparación realizada entre la nube de puntos de cada software y el Modelo As-built, ambos softwares no cumplen con la precisión requerida para dicha supervisión. La metodología científica de la investigación usada en este trabajo es hipotético deductivo, es decir, en la elaboración del problema y, como consecuencia, proponer hipótesis relacionadas con la pregunta de investigación, las cuales serán o no confirmadas en el tiempo de la investigación. En cuanto a los procedimientos metodológicos, a esta investigación de tesis se suman aspectos mixtos, en el sentido de considerar datos documentales y análisis de resultados.

Palabras clave: Fotogrametría, As-Built, BIM, drone, supervisión de obra, PIX4D, Bentley, ContextCapture.

ABSTRACT

When carrying out a construction supervision, it is usual to request updates or surveys to obtain data on the current situation of the same, which are generally carried out using traditional methods, generating rework that requires a lot of time and causing an increase in costs (Ibaceta, 2018). For this reason, a comparison will be made between the use of photogrammetry and the traditional model, using an As-Built model as a guide, which will be generated through traditional topographic surveys that are reflected in the As-Built updates with the latest information available. through 3D models and 2D plans. The objective of this thesis is to compare the results obtained in the construction supervision of a building by photogrammetry and compare it with the As-Built model. In addition, the data processing carried out in two photogrammetric software will be compared to define the precision that can be obtained because of the use of this new technology. It was observed that, in all the comparisons carried out, the ContextCapture software has greater precision than Pix4D. Likewise, based on the results of the Quality Reports, both software meets the necessary precision for construction supervision in a building. While, in the comparison made between the point cloud of each software and the As-built Model, both softwares do not meet the precision required for said supervision. The scientific research methodology used in this work is hypothetical-deductive, that is, in the elaboration of the problem and, therefore, proposing hypotheses related to the research question, which will or will not be confirmed at the time of the research. Regarding the methodological procedures, mixed aspects are added to this thesis research, in the sense of considering documentary data and analysis of results.

Keywords: Photogrammetry, As-Built, BIM, drone, work supervision, PIX4D, Bentley, ContextCapture.

INTRODUCCIÓN

Si bien ha aparecido nuevas técnicas de recolección de datos o levantamientos topográficos a través de los años, se sigue manteniendo vigente la utilización de sistemas tradicionales que demandan más tiempo y puede generar pérdidas de información por error humano que se podrían evitar, sin embargo; se siguen realizando debido a la confiabilidad de los equipos y la precisión que han alcanzado. La fotogrametría nace como la técnica que consiste en plasmar la realidad representada lo más preciso posible mediante. Como su propio nombre lo dice, las fotografías se capturan no necesariamente de equipos profesionales, pero se recomiendan, como la utilización de drones mediante un software, previamente trabajado. Este método requiere menor tiempo y mano de obra en comparación con levantamientos tradicionales y puede ser utilizado para cualquier momento del proyecto, según se disponga.

Al momento de realizarse una supervisión o actualización de obra, se requiere de información lo más pronto posible para constatar con lo establecido en el planeamiento y ante la necesidad de reducir los problemas que esto trae se hace necesario investigar las diferencias y/o beneficios los métodos que se están planteando con el fin de satisfacer una misma necesidad, tal vez a un menor tiempo con una precisión similar o mejor. Es por ello, que nace la idea de realizar este trabajo donde se determinará, los beneficios que trae el uso de la fotogrametría en la supervisión de una obra en construcción.

En esta investigación, las etapas son descritas a lo largo del informe y se detallarán las metodologías utilizadas para ambos métodos en la recolección y el procesamiento de la información de datos.

Planteamiento del problema

Uno de los problemas más comunes en la construcción de una edificación es la pérdida de tiempo en levantamientos del estado existente durante la obra. Esto se viene dando a través de levantamientos topográficos tradicionales que son plasmados en las actualizaciones As-Built con la última información a través de modelos 3D y planos 2D, las cuales se desarrollan en periodos semanales. Además, hay que tener en cuenta la

precisión de las actualizaciones, ya que, si existe algún error, solo se podrá encontrar semanas después de la ejecución, lo cual es una desventaja porque ya hay un avance constructivo. En consecuencia, se producen errores y retrabajos que generan retrasos y mayores costos (Ibaceta, 2018).

La implementación de nuevos métodos genera cierto grado de desconfianza por la falta de conocimiento en la calidad de los resultados obtenidos y/o el realizar gastos extras, como adquirir nuevos equipos, horas de entrenamiento y capacitación del personal, pues están acostumbrados al método tradicional (Diazgranados, 2018). Sin embargo, los proyectos actuales, junto con los nuevos métodos que van surgiendo a través de los años, hacen que la exigencia hacia la reducción de tiempo y costos sea mayor.

Pregunta de investigación e hipótesis

En la presente tesis se investigan los beneficios que tiene realizar la supervisión de obra de una edificación mediante fotogrametría, comparado los resultados obtenidos con un modelo As-Built. Por lo cual se buscará conocer la precisión en el levantamiento mediante el uso de fotogrametría en contraste con la información del modelo As-Built, cuánto se reducirán los tiempos de ejecución mediante el uso de fotogrametría, los tiempos de procesamiento requeridos y cuánto tiempo se requerirá cada para realizar actualizaciones de datos de la obra. Como consecuencia, se maneja la hipótesis general de que la supervisión de obra de una edificación por fotogrametría nos brinda mayor eficiencia y rentabilidad, y permitirá actualizar el modelo As-Built con igual o mayor fiabilidad que con un levantamiento topográfico tradicional. Por lo tanto, se espera que: la precisión de resultados entre el levantamiento por nube de puntos (fotogrametría) es mayor comparado con el levantamiento tradicional, el levantamiento mediante una nube de puntos (fotogrametría) generará un ahorro de tiempo y costos considerable y notorio al momento de realizarse una supervisión o actualización de obra, el método por fotogrametría brinda mayor detalle y precisión del levantamiento mediante la nube de puntos.

Justificación

El presente proyecto de investigación es importante para la ciencia y el conocimiento porque fomenta la innovación promoviendo la creación de nuevos métodos y tecnologías para los proyectos de construcción. A su vez, se deja una línea de investigación para futuras investigaciones. El uso de nuevos métodos para los levantamientos, como la fotogrametría, permite mayor eficiencia y fiabilidad durante la supervisión de obras, lo que generaría menores costos y tiempos de entrega. Aportando así al objetivo de desarrollo sostenible (ODS 9) de la industria, innovación e infraestructura.

Además, la siguiente tesis es de suma importancia para los nuevos encargados en la supervisión al momento de plantear posibles soluciones. Asimismo, muestra la variabilidad entre los resultados obtenidos implementando la medición o levantamiento por fotogrametría mediante una nube de puntos, concluyendo que significaría un mayor gasto la utilización de esta última.

Adicionalmente, se desconocen los principales beneficios del levantamiento mediante la nube puntos, por lo que este proyecto de investigación daría a conocer dicha información con todos los datos detallados y llevados a la práctica con una comparación totalmente realizada por los autores, ya que se necesita validar dicha aplicación para que pueda ser utilizada en obra.

Objetivos

- Objetivo general

Determinar si la precisión obtenida por fotogrametría es la apropiada para la supervisión de obra de una edificación.

- Objetivos específicos
 - Utilizar dos softwares de procesamiento fotogramétrico para determinar la precisión de este método en supervisión de obras.
 - Analizar los resultados obtenidos mediante la fotogrametría y compararlos con la data generada en el modelo As-Built del proyecto para validar la precisión, aportando al desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación (meta 9b, ODS 9).

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

Este capítulo aborda temas relevantes para la línea de investigación de calidad de vida y bienestar de la Universidad de Lima y el área académica de la Ingeniería Civil, a partir de la construcción del Marco Teórico sobre la comparación entre la supervisión de obra de una edificación por fotogrametría y modelo As-Built.

Posteriormente, se presenta el Estado del Arte destacando los estudios de caso y revisiones con aplicabilidad de técnicas sobre la necesidad de los usuarios de métodos y tecnologías más eficientes para realizar levantamientos y actualizaciones en obra.

1.1 Marco teórico – conceptual

1.1.1 BIM, modelado de la información de edificios

Metodología de trabajo que se desarrolla mediante un modelo de construcción virtual en 3D compartido de un objeto, ya sea edificios, carreteras, plantas de proceso, puentes, túneles, entre otros, para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación, generando una base confiable para la toma de decisiones.

BIM no solo aporta beneficios técnicos al proceso de desarrollo, sino que ofrece una plataforma de trabajo innovadora e integrada para mejorar la productividad y la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida del proyecto (como se citó en Chong et al., 2017, p. 4115).

BIM durante el ciclo de vida del proyecto:

Carlos González (2015), define la fase de ejecución como:

Corresponde a la puesta en marcha del proyecto que se ha diseñado. Debe ser una continuación de este en la cual se utiliza la información allí plasmada y se actualiza. Es obvio que la fase de ejecución no tiene la precisión que la fase de proyecto puede otorgar. En el momento del diseño, por más información que tengamos, no se pueden tener en cuenta todos los

condicionantes externos que se generan en el momento de la ejecución. Por ello, hay que tener claro que la ejecución no va a ser exacta a lo estimado en proyecto. Cada vez seremos más eficaces, pero nunca exactamente igual. Además, durante la ejecución siempre se producen modificaciones obligadas por el cliente. Es por ello, que la fase de ejecución debe dedicarse a actualizar el modelo previsto en proyecto, es lo que se conoce como modelo "As-Built", es decir, una actualización conforme a lo ejecutado en obra.

En esta fase, además, corresponde el uso de todas las herramientas de gestión. Tras actualizar los pequeños detalles que se hayan modificado, se pueden realizar las certificaciones oportunas de lo ejecutado o cálculos temporales para observar la demora o adelanto de la obra. (p. 34)

Software BIM de la Plataforma de Autodesk:

Medina y Ramírez (2019) mencionan sobre Autodesk:

Es una empresa que se caracteriza por implementar programas innovadores que benefician y permiten el progreso del mundo tecnológico actualmente. Reconocido principalmente por su software AutoCAD. Este, compró Revit y lo proclamara su "buque insignia" para el mercado arquitectónico. El cual, con la metodología BIM se hizo necesario complementar Revit building con estructura y MEP. (p. 19)

Revit Structure llegó en 2005 y Mechanical and Electrical llegó en 2006. Revit fue diseñado para arquitectos, pero poco a poco evoluciona, con el fin de ser útil para los ingenieros (Diazgranados, 2018, p. 24).

Medina y Ramírez (2019) también menciona sobre Revit:

Este software con innovadoras estrategias de diseño permite plasmar los elementos de forma única en su base de datos. Cada modelo se puede elaborar por partes, teniendo en cuenta la especialidad que posee cada plantilla junto con sus herramientas de trabajo. La facilidad de exportar y trabajar por separado los componentes del proyecto a construir es con el fin de evitar modelos deficientes. (p.19)

1.1.2 Fotogrametría

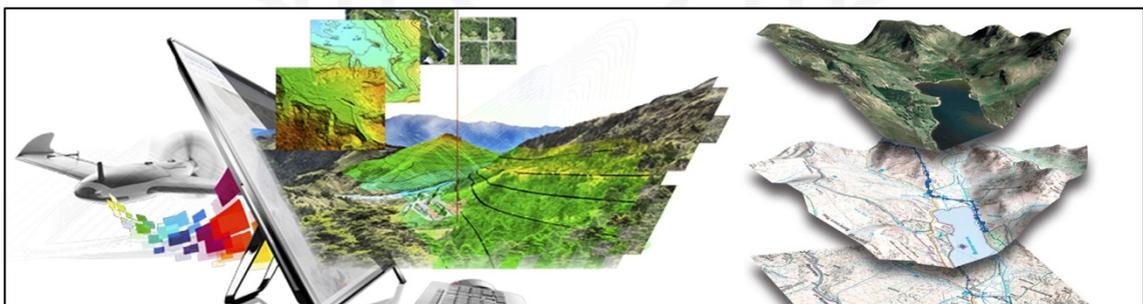
A lo largo de los años la definición de esta ha ido evolucionando con los métodos de cómo se realizaba o hasta la variación de resultados, pero una de las más importantes, según Salvador Peña, le dio H. Bonneval, que decía: “...La técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto”. Vale precisar que otras definiciones han expresado su semejanza coincidiendo en que el principal objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio.

Según Asunción Morales, la palabra fotogrametría deriva del vocablo “fotograma”, como algo listo que está a disposición y el “matrón”, que es medir. Por lo que al juntarlos el concepto de la fotogrametría resulta: “medir sobre fotos”.

Entonces, como se muestra en la Figura 1.1, se puede decir que la fotogrametría es la ciencia que permite obtener medidas del objeto o lugar, mediante fotografías, ya sea por vía terrestre o vía aérea.

Figura 1.1

Muestra de extracción de datos



Nota. De *Topland Topografía* (<https://www.topland.es/servicios-topografia-topland-topografos/cartografia-fotogrametria-topland.html>).

En la Tabla 1.1 se describen algunas dificultades que puede tener la fotogrametría y que hay que tener en consideración.

Tabla 1.1

Entornos favorables y desfavorables para el uso de fotogrametría

Entornos Favorables	Entornos Desafiantes
Rocas naturales	Muro de hormigón con alta uniformidad
Paredes de ladrillo	Pintura homogénea y/o brillante
Pintura antigua, grietas y corrosión	Superficie metálica brillante, acero inoxidable
Superficies sucias, algas	Ventanas de cristal

Nota. Adaptado de *Automatización de procesos constructivos de material ligero dentro de una obra*, por P. Hevia, 2021. Universidad de Chile (<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/180294/Automatizacion-de-procesos-constructivos-de-material-ligero-dentro-de-una-obra.pdf?sequence=1>)

1.1.3 Fotogrametría aérea

Se da mayormente cuando las fotografías son obtenidas por medio de vehículos aéreos o espaciales, en donde el eje óptico de la cámara fotográfica está dirigido sensiblemente perpendicular al terreno, de tal manera que permita la formación de una imagen oblicua o vertical de la superficie terrestre.

1.1.4 Fotogrametría terrestre

Las fotografías son capturadas, en su mayoría, desde un punto o estación de la superficie terrestre, colocando el eje óptico de la cámara horizontalmente o paralelo a la superficie terrestre.

1.1.5 Fotogrametría volumétrica

Ibaceta (2018), define una nube de puntos como:

El resultado de la taquimetría tradicional utilizando teodolitos ópticos y, posteriormente, con estaciones totales para obtener un listado de diferencias de coordenadas Δx , Δy , y Δz que en relación con las coordenadas de la estación nos permiten obtener las coordenadas de los puntos en un modelo tridimensional, es decir “nube de puntos”. (p. 5)

En la Figura 1.2 se observa la visualización y navegación en web del estado de trabajo en progreso en sitios de construcción utilizando imágenes recolectadas por UAV, nubes de puntos 4D y BIM 4D.

Figura 1.2

Visualización y navegación basadas en web del estado del trabajo en progreso en sitios de construcción



Nota. De Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. visualization in engineering, por Ham1, Y., Han, K., Lin, J., Golparvar-Fard, M., 2016, *Visualization in Engineering* (DOI: 10.1186/s40327-015-0029-z).

1.1.6 Modelo As-Built

Se le conoce como modelo As-Built al modelo final presentado para la ejecución propia de la obra es el registro del proyecto tal como se ha construido en el lugar, incluyendo los cambios de diseño ocurridos en el curso de trabajo.

1.1.7 Supervisión de obra

Rómel Solís (2004), comenta sobre 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 estructurales y de servicio en las construcciones no son atribuibles a deficiencias del diseño o de los materiales, sino principalmente, al mal desempeño de la supervisión. El profesional que desempeña el trabajo de supervisor de obra se enfrenta no sólo a problemas de carácter técnico, sino también a conflictos generados por la interacción humana. Además de las competencias necesarias para afrontar los problemas de carácter técnico y humano, el supervisor debe contar con un conjunto de valores y actitudes positivas para un adecuado desempeño de su labor. Para el cumplimiento de sus objetivos, la supervisión debe hacer un uso correcto de los medios de comunicación a su alcance, principalmente de la bitácora de obra. (p. 55)

1.2 Estado del arte

1.2.1 Antecedentes

1.2.1.1 Levantamiento convencional

Montes de Oca (1989) señala: “La Topografía es una parte básica y fundamental dentro del campo de la Ingeniería Civil, esta teoría se basa principalmente en la geometría plana, geometría del espacio o matemáticas en general” (p. 2).

Otros autores mencionan a la topografía tradicional como “La ciencia y el arte de realizar unas mediciones necesarias para hallar o revelar la posición relativa de puntos sobre o debajo de una superficie terrestre, o como para situar”.

1.2.1.2 Historia

Esta fotogrametría nace de la disponibilidad de imágenes topográficas que pueden ser capturadas de variados métodos que se puede utilizar con fines cualitativos, pero al momento de interpretarlos se hace de manera cuantitativa o métrica. La disponibilidad de estas capturas fotográficas fue gracias a la evolución científica y técnicas que han ido mejorando con la práctica y mayor uso de estos métodos a lo largo de los años, considerando que el descubrimiento del origen de estas está en constante estudio, ya que se utilizaron o relacionaron métodos como las de Euclides, junto con la mención de Platón en su obra la “La República”, y así evoluciona en autores como Leonardo da Vinci que experimentó con cámaras oscuras; Galileo Galilei, y acabando con R. Snell y Renato Descartes determinaron las leyes de refracción.

Según Martínez Corza, la primera referencia a la fotografía desde el aire fue realizada por D. F. Aragón, un físico francés, nació en 1839 un poco después del nacimiento del proceso del conocido “daguerrotipo”. Pero quien realmente tomó una fotografía fue Gaspard Félix Tounachon en 1858.

Sin embargo, el coronel francés Aimé Laussedat del “Cuerpo Francés de Ingenieros del Ejército” probó matemáticamente que era posible la conversión de fotografías en perspectivas trasladadas en proyecciones ortográficas sobre un plano, gracias a esto a él se le conoce como el “Padre de la Fotogrametría”.

1.2.2 Casos de estudio

Actualmente se han realizado diversos estudios que han examinado el desarrollo de nuevos métodos y tecnologías para realizar levantamientos y actualizaciones más precisas en obra generando mayor eficiencia y rentabilidad. Entre los principales trabajos científicos identificados que aportan a la investigación en curso se destacan los estudios que son relacionados a continuación en orden cronológico en la Tabla 1.2.

Es importante destacar que la mayoría de los estudios realizados hasta la fecha sobre el desarrollo de nuevos métodos y tecnologías para realizar levantamientos y actualizaciones más precisas en obra generando mayor eficiencia y rentabilidad han sido desarrollados en Asia y Estado Unidos que incluyen trabajos de estudio descriptivo.

En común en estos estudios se observó el desarrollo de un método con el objetivo de garantizar la precisión en los levantamientos y actualizaciones en los proyectos.

Tabla 1.2

Estado del arte - Desarrollo de nuevos métodos y tecnologías para realizar levantamientos y actualizaciones más precisas en obra generando mayor eficiencia y rentabilidad

ID	TÍTULOS	AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	LOCAL DE ESTUDIO	AÑO
1	Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A review of related works	Ham1, Y., Han, K., Lin, J., & Golparvar-Fard, M.	Caso de estudio	Miami, Estados Unidos	2016
2	Systemic Approach to Elevation Data Acquisition for Geophysical Survey Alignments in Hilly Terrains Using UAVs	Ismael, M., Kumar, N., Abidin, M., & Madun, A.	Caso de estudio	Penang, Malasia	2018
3	Applications of multirotor drone technologies in construction management	Li, Y., & Chunlu, L.	Caso de estudio	Geelong, Australia	2018
4	Drones in Construction. Social science research network (SSRN)	Loveless, C.	Caso de estudio	Washington D.C., Estados Unidos	2018
5	Construction Monitoring and Reporting using Drones and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)	Anwar, N., Izhar, M., & Najam, F.	Caso de estudio	Colombo, Sri Lanka	2018
6	Digital transformation: The case of the application of drones in construction	Zaychenko, I., Smirnova, A., & Borremans, A.	Caso de estudio	St. Petersburg, Rusia	2018

Nota. Elaboración propia

- Los autores Ham1 et al. (2016) presentan una breve revisión de los métodos más recientes que agilizan la recopilación, análisis, visualización y comunicación de la base de datos visuales captados a través de plataformas UAV (VANT). Se discutieron y compararon los trabajos más relevantes relacionados a las áreas de Ingeniería Civil, visión artificial (computer visión) y robótica. La investigación presenta importantes lagunas de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones acerca de los métodos mencionados anteriormente.
- El autor Loveless (2018), propone el uso de drones en el sector construcción como medida de innovación. Este estudio evalúa los beneficios del uso de drones en la industria comercial, su aplicación en construcciones, las responsabilidades que supone y sus implicancias legales, a través de revisión de la literatura y casos de estudio. Loveless concluye que los drones suponen un beneficio para la industria de la construcción; sin embargo, debe tenerse en cuenta el riesgo que representan operadores inexpertos, fallas mecánicas y pólizas de seguro limitadas.
- Los autores Anwar et al. (2018) propone una estructura para el desarrollo de un sistema de informes y monitoreo de construcción inteligente enteramente automatizada basado en datos en tiempo real obtenidos de drones y UAV's, a través del análisis de un caso de estudio con la aplicación de estas tecnologías. Se demostró que este sistema automatizado puede reducir significativamente el esfuerzo requerido en el monitoreo de una construcción tradicional y reporte de avances.
- Li & Chunlu (2018) proponen la investigación y análisis de las actuales aplicaciones de drones multi rotor y explora su potencial en el futuro de la industria de construcción. Para ello, se revisaron y clasificaron los usos de drones multi rotor, se analizaron y discutieron los méritos y limitaciones, y finalmente, se sintetizaron las futuras tecnologías de drones con la finalidad de contribuir en una rápida adopción de nuevas tecnologías en la industria de

la construcción. Los resultados aseguran que las principales contribuciones son seguridad en el trabajo, relación costo-beneficio y reducción de las emisiones de carbono.

- Los autores Zaychenko et al. (2018) propone un método de análisis y síntesis para la evaluación del uso de drones en el manejo de construcciones. Para ello, se analizó la efectividad de la introducción de tecnologías modernas en el sector, así como se compararon y clasificaron diversas investigaciones y equipos UAV's. Se concluyó en el resultado de ventajas y desventajas de su aplicación en el sector construcción, tales como la reducción en el costo de topógrafos y recursos.

- Los autores Ismael et al. (2018) presentan un enfoque sistemático del levantamiento fotogramétrico que es aplicable en la extracción de datos de elevación para levantamientos geofísicos en terrenos montañosos usando drones (UAV). El resultado será adquirir datos geofísicos de alta calidad de áreas donde las elevaciones varían al ubicar las mejores líneas de levantamiento. Se llevaron a cabo estudios para identificar la precisión del modelo de elevación digital (DEM) producido a partir de un UAV a 100 m de altitud, adquiriendo más de 135 imágenes superpuestas utilizando un quadcopter DJI Phantom 3. Todas las imágenes adquiridas se procesaron para la reconstrucción automática de fotografías en 3D utilizando el software fotogramétrico digital Agisoft PhotoScan, que se aplicó a todas las etapas fotogramétricas. Los productos generados incluyeron un modelo 3D, nube de puntos densa, superficie de malla, ortofoto digital y DEM. Al validar la precisión del DEM producido, las coordenadas del punto de control terrestre seleccionado (GCP) de la línea de levantamiento en el área de imágenes se extrajeron del DEM generado con la ayuda del software Global Mapper. Estas coordenadas se compararon con los GCP obtenidos mediante un sistema de posicionamiento global cinemático en tiempo real. El porcentaje máximo de diferencia entre GCP y la encuesta de fotogrametría es del 13,3%. En conclusión, es factible el uso de UAV para adquirir datos de elevación para el

trabajo de levantamiento geofísico, ya que, esta técnica se puede adoptar como un enfoque sistémico para adquirir datos de elevación del sitio en períodos cortos y con un bajo costo de operación. También se pueden obtener datos muy precisos con respecto a reglas, técnicas y limitaciones. No obstante, la calidad de los resultados depende del número y la calidad de las imágenes de entrada y del procesamiento, así como del número adecuado de GCP que cubran todo el sitio. Así mismo, el uso de drones ofrece obviamente muchas aplicaciones potenciales, incluido el monitoreo de pendientes, el progreso del proyecto de construcción y la determinación de la excavación.



CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

La construcción de este capítulo fue posible gracias a las bases teóricas estudiadas. El Capítulo II aborda la descripción de la metodología científica de esta investigación, considerando las características climáticas de la ciudad de Lima (Perú), un contexto de pandemia mundial y las particularidades del campus universitario de la Universidad de Lima refiriéndose a la arquitectura de su entorno construido (fijo y temporal) para la construcción de un nuevo pabellón para la implementación de un nuevo sistema constructivo más eficiente desde el punto de vista económico, social y ambiental. Para ayudar a este entendimiento, se realizó la identificación y definición de los procesos de coordinación iniciados entre los actores y los datos requeridos para su ejecución.

Según Hernández-Sampieri (2014), la metodología científica de la investigación de esta tesis de pregrado en ingeniería civil es el hipotético deductivo que se basa en la elaboración del problema para luego proponer hipótesis relacionadas con la pregunta de investigación, las cuales serán o no confirmadas en el tiempo de la investigación. En cuanto a los procedimientos metodológicos, a esta investigación de tesis se suman aspectos mixtos, en el sentido de considerar datos documentales y análisis de resultados.

2.1 Área de estudio

2.1.1 Ubicación

La obra se ubica en la Universidad de Lima en el distrito de Santiago de Surco, departamento de Lima, Perú. Como se visualiza en la Figura 2.3, el campus está delimitado por la Av. Javier Prado Este, Av. Club Golf los Incas, Jr. Cruz del Sur y Av. Manuel Olgúin.

Figura 2.3

Ubicación del pabellón “F1” de la Universidad de Lima



Nota. Google Earth, 2023

2.1.2 Tipo de estudio

El tipo de investigación trabajo es tecnológica, debido a la utilización innovadora de drones y demás herramientas como los softwares y el modelo para la comprobación de la investigación.

2.1.3 Población y muestra

2.1.3.1 Población:

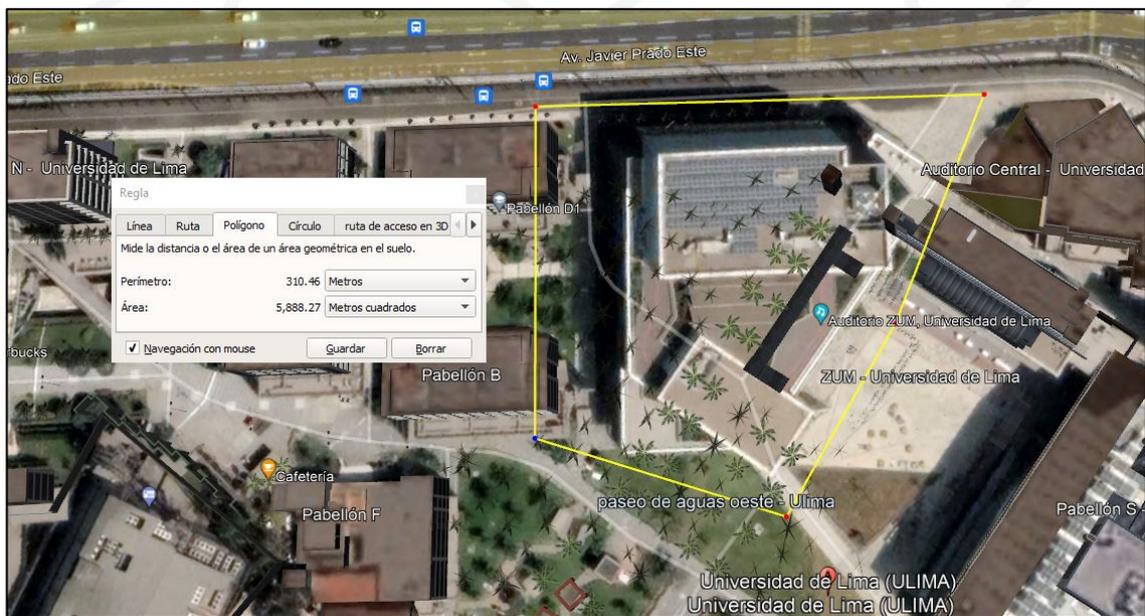
La población es el proyecto brindado por Sasaki, firma interdisciplinaria de arquitectura, planificación, paisajismo y diseño con un enfoque en el cambio para lograr diseños sustentables y resilientes, que será evaluado dentro de la Universidad de Lima.

2.1.3.2 Muestra

La muestra seleccionada fue el pabellón “F1” (Centro de Bienestar Universitario) que se construyó dentro del campus universitario, el cual forma parte del diseño del Plan Maestro de la Universidad de Lima a cargo de Antonio Furukuwa, senior associate designer de Sasaki. La infraestructura propuesta está diseñada para mejorar y diversificar la experiencia académica de los estudiantes en el campus. Además, este pabellón cuenta con la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) en categoría de oro, debido a que utiliza energía renovable para reducir su huella de carbono. Se le realizó un levantamiento fotogramétrico con drones y este será comparado con un modelo As-Built del mismo. El área de obra considerada para este proyecto del pabellón “F1” es de 5,888.27 m² como muestra la Figura 2.4.

Figura 2.4

Área de obra del pabellón “F1” de la Universidad de Lima



Nota. Google Earth, 2023

Para delimitar la cantidad de fotos, tomando una altura de vuelo de 100 metros, a utilizar en la presente investigación se tomaron las siguientes referencias bibliográficas:

- Los autores Arias et al. (2023) proponen en su tesis una muestra de 5 vuelos aproximadamente por un mes y medio de supervisión con una relación de

cantidad de fotos por metro cuadrado de 0.00651 por vuelo para un área cubierta de 39,000 m² con un porcentaje de error mínimo próximo a 0% y máximo de 11%.

- Los autores Ismael et al. (2018), en su artículo de revista, realizaron un vuelo dividido en dos rutas de donde se obtiene una relación de cantidad de fotos por metro cuadrado de 0.00032 para un área cubierta de 422,100 m² con un porcentaje de error mínimo de 4% y máximo de 14%.

Por lo tanto, para el área de obra del pabellón “F1”, tomando como referencia la proporción obtenida de la tesis de los autores Arias et al. (2023), sería de 38; mientras que, si tomamos como referencia la proporción obtenida del artículo de revista de los autores Ismael et al. (2018) se necesitarían 2 fotos.

Para la presente tesis se consideraron los siguientes datos promedio:

- 53 fotos por vuelo, abarcando un área total de 71,000 m².
- 18 fotos por vuelo, abarcando 5,888.27 m² como área de obra del pabellón “F1”.

2.1.4 Diseño de recolección de datos

2.1.4.1 Modelo As-Built

Los datos para la realización del modelo As-Built se obtuvieron mediante levantamientos con cuadrillas topográficas durante todo el periodo en el que se realizó la obra.

2.1.4.2 Fotogrametría

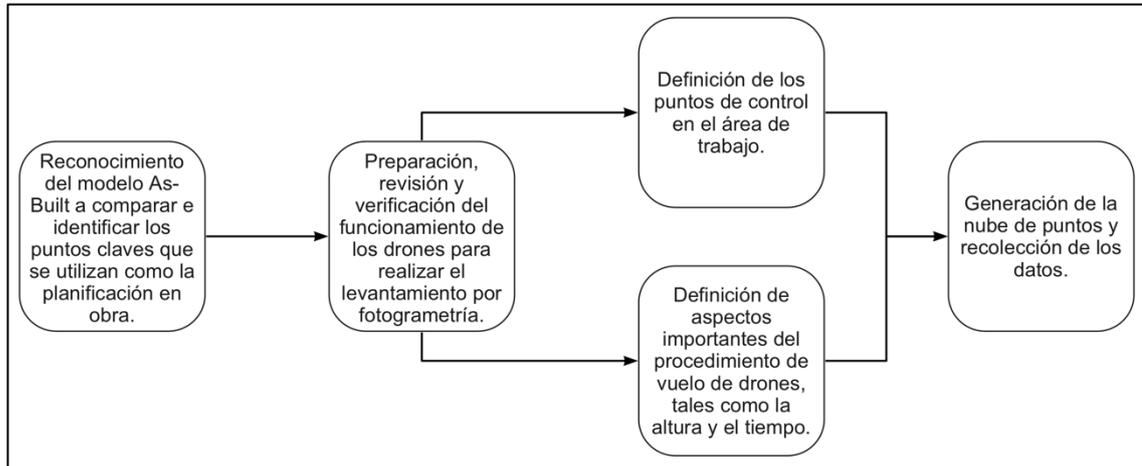
El diseño de recolección de datos para la fotogrametría cuenta con los siguientes pasos, como se visualiza en la Figura 2.5:

1. Reconocer el modelo As-Built a comparar e identificar los puntos clave que se utilizan como la planificación en obra.
2. Preparar los drones, revisarlos y comprobar su funcionamiento para ponerlos en práctica y que realicen el levantamiento por fotogrametría.
3. Definir los Puntos de Control de nuestra área de trabajo.
4. Definir los puntos importantes del procedimiento de vuelo de los drones, tales como la altura de vuelo y un tiempo de vuelo predeterminado.

5. Generar la nube de puntos y recolectar los datos.

Figura 2.5

Diseño de recolección de datos



Nota. Elaboración propia

2.1.5 Instrumentos

Los instrumentos que se utilizarán durante la aplicación serán las revisiones de fichas, revistas, tesis, etc. Además de las herramientas brindadas por el asesor que son la licencia de los softwares, el modelo As-Built y los drones.

2.1.5.1 Softwares

Para la realización de esta tesis se utilizaron dos softwares profesionales de fotogrametría.

- Bentley ContextCapture: Procesa datos de modelado de realidad para producir mallas de realidad, ortofotos, DSM y nube de puntos. Además, permite generar, editar y compartir mallas de realidad 3D a partir de imágenes y/o nube de puntos (Bentley, 2021).
- PIX4D: Usado en fotogrametría para mapeo profesional con drones. Brinda una aplicación gratuita llamada PIX4Dcapture para automatizar el vuelo y transferir datos de imágenes (PIX4D, 2021).

2.1.5.2 Drones

Para la realización de los vuelos sobre la obra se tuvo a disposición dos tipos de drones.

- Mavic 2 Pro: Fabricados en Suecia, las cámaras Hasselblad son famosas por su diseño ergonómico icónico, calidad de imagen sin concesiones y artesanía sueca. Desde 1941, las cámaras Hasselblad han capturado algunas de las imágenes más emblemáticas del mundo, incluido el primer alunizaje (DJI, 2021).

Co-diseñado en asociación con Hasselblad después de dos años de investigación incansable, el Mavic 2 Pro viene equipado con la nueva cámara Hasselblad L1D-20c. La L1D-20c posee la exclusiva tecnología Hasselblad Natural Colour Solution (HNCS) de Hasselblad, 5 que ayuda a los usuarios a capturar magníficas tomas aéreas de 20 megapíxeles con asombrosos detalles de color (DJI, 2021).

En la Figura 2.6 podemos ver la imagen del Mavic 2 Pro y en la Tabla 2.3, sus especificaciones técnicas.

Figura 2.6

Dron Mavic 2 Pro



Nota. De DJI, 2021 (<https://www.dji.com/mavic-2-pro>)

Tabla 2.3*Cuadro de especificaciones técnicas del Mavic 2 Pro*

Sensor	Píxeles efectivos CMOS de 1" : 20 millones
Lente	FOV: aproximadamente 77°
	Equivalente de formato de 35 mm: 28 mm
	Apertura: f / 2.8 – f / 11
	Rango de disparo: 1 m a ∞
Rango ISO	Video:
	100-6400
	Foto:
	100-3200 (automático)
	100-12800 (manual)
Velocidad de obturación	Obturador electrónico: 8-1 / 8000 s
Tamaño de imagen fija	5472 × 3648
Modos de fotografía fija	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5 fotografías
	Horquillado de exposición automática (AEB): 3/5 fotografías horquillados a un intervalo de sesgo de 0,7 EV (JPEG: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s RAW: 5 / 7/10/15/20/30/60 s)
Resolución de video	4K: 3840 × 2160
	24/25 / 30p 2.7K: 2688x1512 24/25/30/48/50 / 60p
	FHD: 1920 × 1080 24/25/30/48/50/60 / 120p
Tasa de bits de video máxima	100 Mbps
Modo de color	Dlog-M (10 bits), admite video HDR (HLG 10 bits)
Sistema de archivos compatible	FAT32 (≤ 32 GB)
	exFAT (> 32 GB)
Formato de foto	JPEG / DNG (RAW)
Formato de video	MP4 / MOV (MPEG-4 AVC / H.264, HEVC / H.265)

Nota. De DJI, 2021 (<https://www.dji.com/mavic-2-pro>)

- Phantom 4 Pro: Una cámara mejorada está equipada con un sensor de 1 pulgada y 20 megapíxeles capaz de grabar videos en 4K/60 fps y fotografías en modo ráfaga a 14 fps. La adopción de una construcción de aleación de titanio y aleación de magnesio aumenta la rigidez de la estructura del avión y reduce el peso, lo que hace que el Phantom 4 Pro similar en peso al Phantom 4. El sistema Flight Autonomy agrega sensores de visión trasera duales e infrarrojos sistemas de detección para un total de 5 direcciones de detección de obstáculos y 4 direcciones de evitación de obstáculos (DJI, 2021).

En la Figura 2.7 podemos ver la imagen del Phantom 2 Pro y en la Tabla 2.4, sus especificaciones técnicas.

Figura 2.7

Dron Phantom 4 Pro



Nota. De DJI, 2021 (<https://www.dji.com/phantom-4-pro>)



Tabla 2.4

Cuadro de especificaciones técnicas del Phantom 4 Pro

Sensor	CMOS de 1" Píxeles efectivos: 20M
Lente	FOV 84 ° 8,8 mm / 24 mm (equivalente al formato de 35 mm) f / 2,8 - f / 11 enfoque automático a 1 m - ∞
Rango ISO	Video: 100 - 3200 (automático) 100 - 6400 (manual) Foto: 100 - 3200 (automático) 100-12800 (manual)
Velocidad de obturación mecánica	8-1 / 2000 s
Velocidad de obturación electrónica	8 - 1/8000 s
Tamaño de la imagen	Relación de aspecto 3: 2: 5472 × 3648 Relación de aspecto 4: 3: 4864 × 3648 Relación de aspecto 16: 9: 5472 × 3078
Tamaño de imagen PIV	4096 × 2160 (4096 × 2160 24/25/30/48 / 50p) 3840 × 2160 (3840 × 2160 24/25/30/48/50 / 60p) 2720 × 1530 (2720 × 1530 24/25/30/48 / 50 / 60p) 1920 × 1080 (1920 × 1080 24/25/30/48/50/60 / 120p) 1280 × 720 (1280 × 720 24/25/30/48/50/60 / 120p)
Modos de fotografía fija	Disparo en ráfaga de un solo disparo: 3/5/7/10/14 fotogramas Horquillado de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas horquillados a 0,7 EV Intervalo de sesgo : 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
Modos de grabación de video	H.265 C4K: 4096 × 2160 24/25 / 30p @ 100Mbps 4K: 3840 × 2160 24/25 / 30p @ 100Mbps 2.7K: 2720 × 1530 24/25 / 30p @ 65Mbps 2.7K: 2720 × 1530 48/50 / 60p @ 80Mbps FHD: 1920 × 1080 24/25 / 30p @ 50Mbps FHD: 1920 × 1080 48/50 / 60p @ 65Mbps FHD: 1920 × 1080 120p @ 100Mbps HD: 1280 × 720 24/25 / 30p @ 25Mbps HD: 1280 × 720 48/50 / 60p @ 35Mbps HD: 1280 × 720 120p @ 60Mbps H.264 C4K: 4096 × 2160 24/25/30/48/50 / 60p @ 100Mbps 4K: 3840 × 2160 24/25/30/48 / 50 / 60p @ 100Mbps 2.7K: 2720 × 1530 24/25 / 30p @ 80Mbps 2.7K: 2720 × 1530 48/50 / 60p @ 100Mbps FHD: 1920 × 1080 24/25 / 30p @ 60Mbps FHD: 1920 × 1080 48 / 50/60 a 80 Mbps FHD: 1920 × 1080 120p a 100 Mbps HD: 1280 × 720 24/25 / 30p a 30 Mbps HD: 1280 × 720 48/50 / 60p @ 45Mbps HD: 1280 × 720 120p @ 80Mbps
Tasa de bits de video máxima	100 Mbps
Sistemas de archivos compatibles	FAT32 (≤32 GB); exFAT (> 32 GB)
Foto	JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG
Video	MP4 / MOV (AVC / H.264; HEVC / H.265)
Tarjetas SD compatibles	Capacidad máxima de Micro SD : 128 GB Velocidad de escritura ≥15 MB / s, se requiere clasificación Clase 10 o UHS-1
Rango de temperatura de funcionamiento	32 ° a 104 ° F (0 ° a 40 ° C)

Nota. De DJI, 2021 (<https://www.dji.com/phantom-4-pro>)

2.1.6 Métricas

Las métricas usadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación son la precisión de las metodologías, el tiempo empleado para la ejecución del levantamiento y el tiempo de procesamiento de datos. Estas métricas no son únicas, es decir, son usadas a nivel global.

2.2 Impactos de la de tesis

La presente tesis es importante para la ciencia y el conocimiento porque tiene como meta fomentar la innovación promoviendo la creación de nuevos métodos y tecnologías para los proyectos de construcción. Generando proporción del valor añadido por la industria tecnológica mediana y alta en el valor añadido total. Además, como se visualiza en la Tabla 2.5, busca facilitar el desarrollo de infraestructuras resilientes mediante el apoyo técnico y tecnológico. Aportando así al objetivo de desarrollo sostenible (ODS 9) de la industria, innovación e infraestructura.

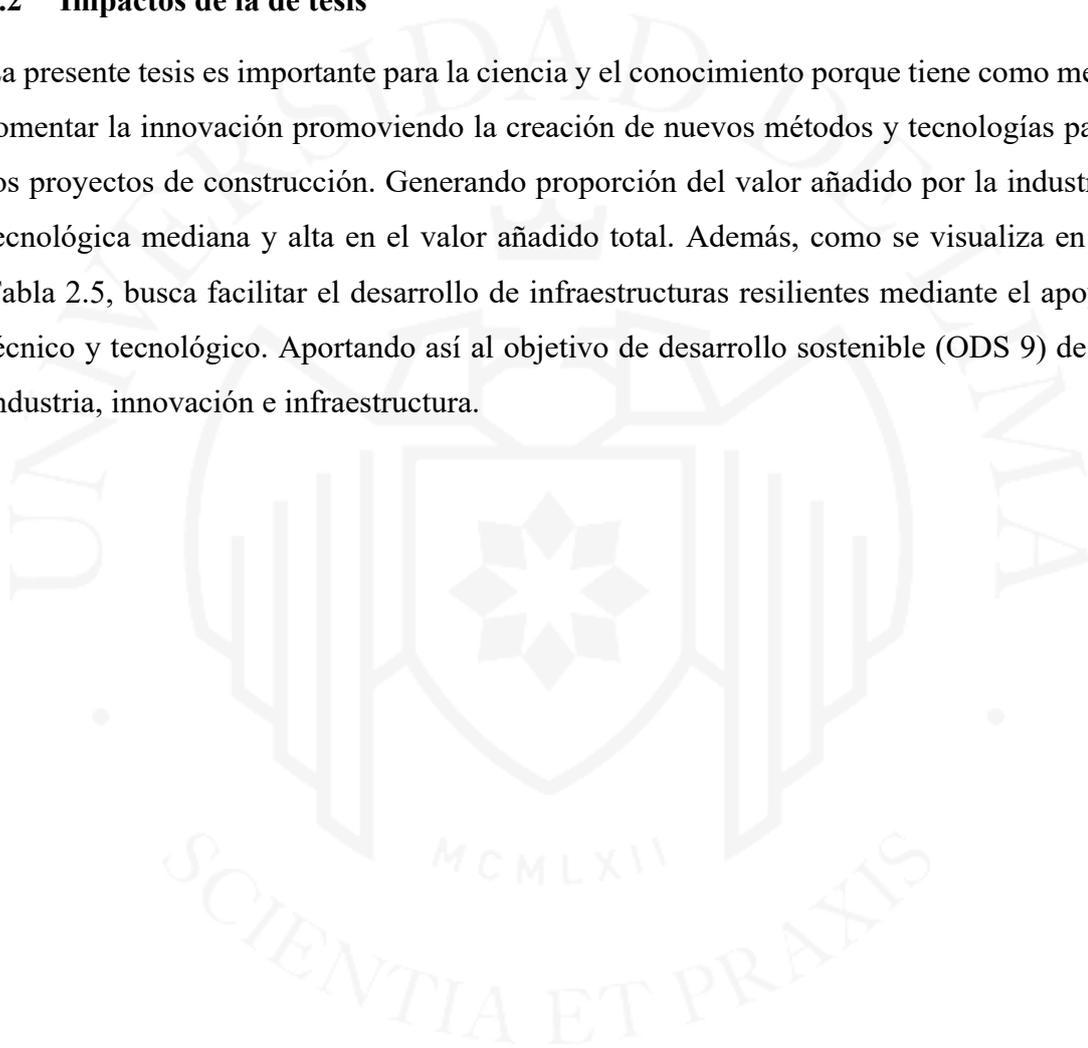


Tabla 2.5*Contribución a los ODS*

ÁMBITO	ODS	META ODS	ACTIVIDAD PREVISITA
Económico	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.	Con las simulaciones en As-Built y fotogrametría se disminuyen los retrabajos por lo tanto se da una gran reducción de costos, asimismo, se dejará una línea de investigación para generaciones futuras.
Social	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.b Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.	Si la hipótesis es comprobada, generará mayor diversificación de pequeñas empresas que se dediquen a la fotogrametría en obra, lo cual generará mayor empleo.
Ambiental	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.	El uso de fotogrametría a diferencia del modelo As-Built disminuye retrabajos, por lo tanto, disminuye el impacto ambiental. Eso se dará si se comprueba que esta metodología es más precisa que la otra

Nota. Elaboración propia

Las Figuras 3.9 a 3.11 son algunas de las fotos tomadas el 04 de agosto de 2020. Los drones sobrevolaron el pabellón “F1” que estaba siendo construido dentro del campus de la Universidad de Lima con la finalidad de obtener información detallada del estado de la obra, como el avance, en los periodos en que se realizaron los recorridos de cada vuelo. Para visualizar todas las fotografías tomadas y recolectadas para el desarrollo de esta tesis, ingresar al siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1OIf0Jr6Yw7yW3fxbJHvQDhGVyNJZ6FAN?usp=sharing>

Figura 3.9

Fotografía DJI_0721



Nota. Elaborado por el Laboratorio de Simulación de la Universidad de Lima.

Figura 3.10

Fotografía DJI_0729



Nota. Elaborado por el Laboratorio de Simulación de la Universidad de Lima.

Figura 3.11

Fotografía DJI_0738



Nota. Elaborado por el Laboratorio de Simulación de la Universidad de Lima.

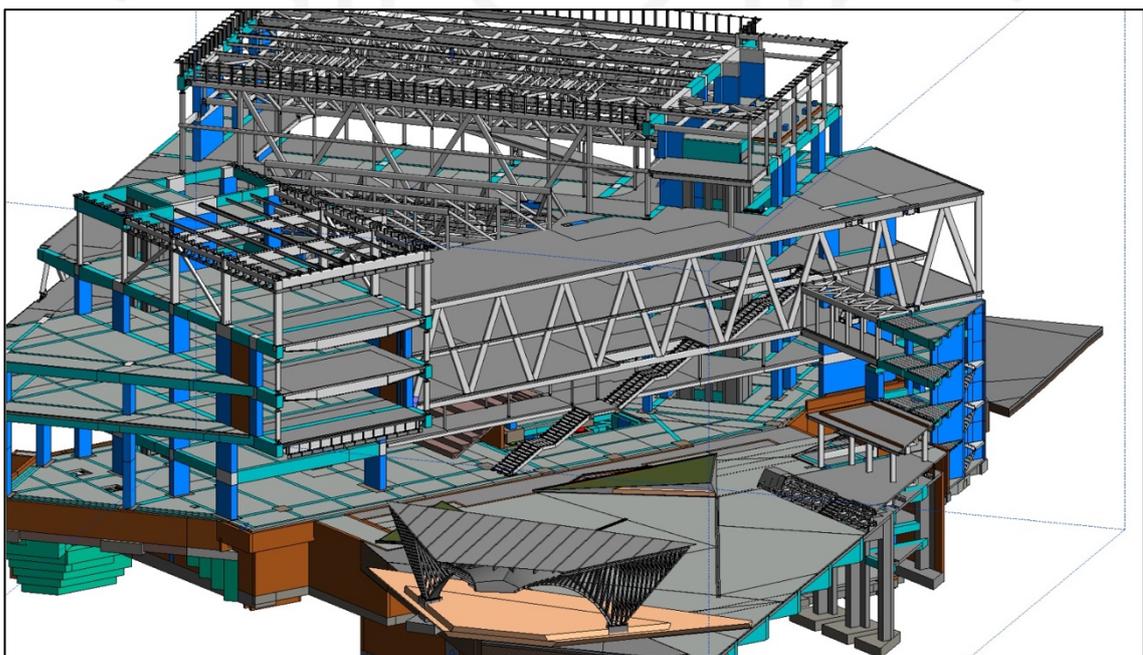
3.2 Procesamiento de datos

Para procesar los datos recolectados mediante las cuadrillas topográficas y generar el modelo As-Built que muestra la Figura 3.12, se utilizaron el software Revit, Civil 3D y, finalmente, se pasó a BIM 360. Por otro lado, para el procesamiento de los datos recolectados con los drones se utilizaron dos softwares de fotogrametría profesional, los cuales son Pix4D y ContextCapture (Bentley). Luego, las nubes de puntos generadas por estos últimos se procesaron en el software ReCap Autodesk para crear una representación en 3D de cada resultado.

Los softwares de fotogrametría se eligieron debido a que ya contábamos con las licencias activas y gestionadas en la Universidad de Lima. De lo contrario, hubiésemos tenido que diligenciar las licencias, el soporte de instalación, entre otras especificaciones técnicas, asumiendo la siguiente inversión por cada software respectivamente: USD \$370.00 en la suscripción mensual y USD \$3,500.00 en la suscripción anual para Pix4Dmapper, mientras que para obtener el software ContextCapture se tiene que adquirir una suscripción anual de la colección Reality Modeling Worksuite a un costo de USD \$3,902.00.

Figura 3.12

Modelo As-Built



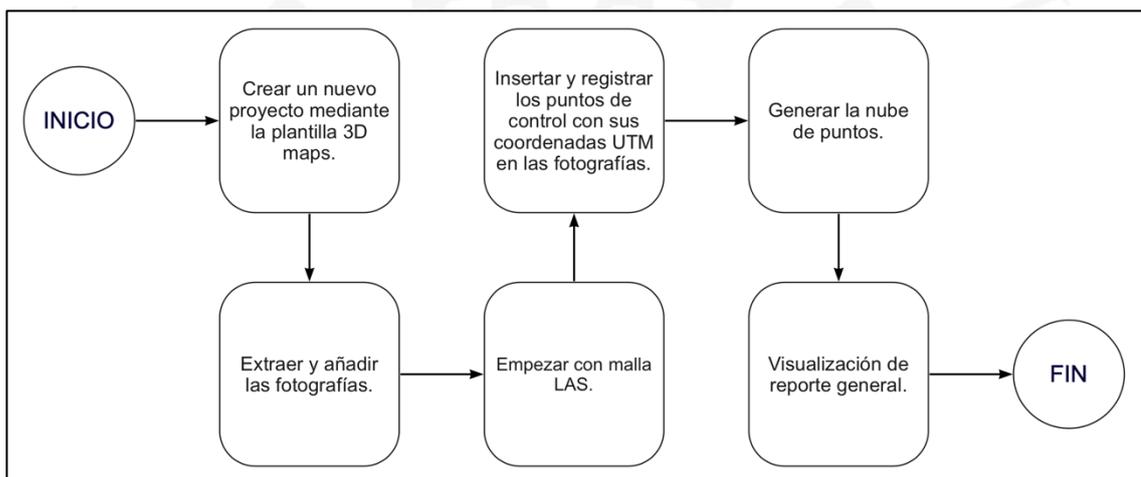
Nota. Elaboración Sasaki

3.2.1 Pix4D

Para el procesamiento de datos en este software, como muestra la Figura 3.13, se comienza con la creación de un nuevo proyecto mediante la plantilla “3D maps”, luego se extraen y añaden las fotografías obtenidas del dron mediante la opción “frames”, generamos la malla LAS, la cual es importante para que el formato se pueda trabajar en el software Revit. Después se insertan y registran los puntos de control (GCP’s) con sus coordenadas UTM en las fotografías (por lo menos 3 GCP’s en 2 imágenes), seguido de la generación de la nube de puntos. Finalmente, se obtiene el “Quality report”, es decir, el reporte general.

Figura 3.13

Procesamiento mediante el software Pix4D



Nota. Elaboración propia

3.2.1.1 Reporte general del procesamiento

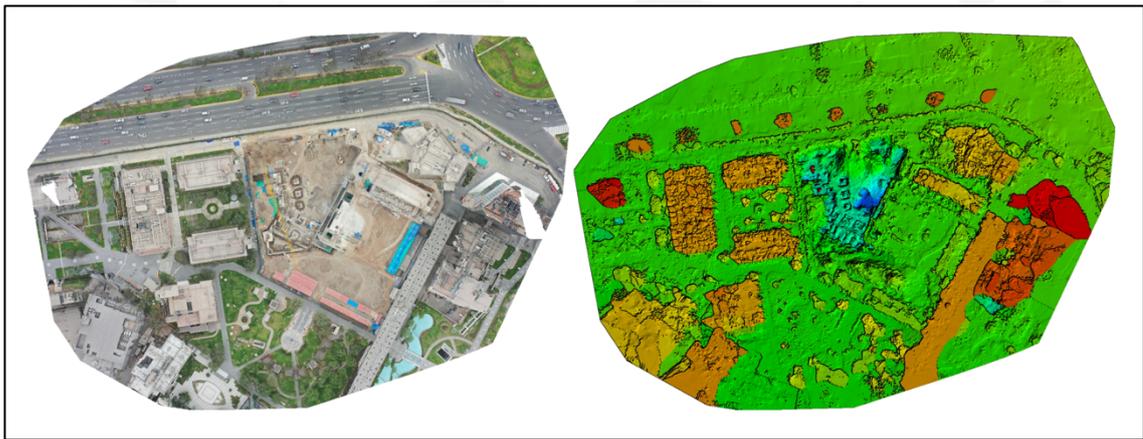
Pix4D nos genera un reporte general llamado “Quality Report”, donde se pueden visualizar los detalles de calibración, geolocalización, procesamiento inicial, el ortomosaico, entre otros.

Para el procesamiento del día 04 de agosto de 2020, se obtuvo un tamaño del píxel de la cámara de 2.73 cm, un área cubierta de 0.052 km² y un tiempo de procesamiento inicial sin reporte de 5 minutos con 36 segundos.

El ortomosaico y el Modelo de Superficie Digital (DSM) mostrados en la Figura 3.14, respectivamente, son el resultado de la calibración de 45 imágenes al 100% con una media de 22,720.2 coincidencias por imagen calibrada, con 5 puntos de control, 52,371 puntos clave por imagen y un error promedio de procesamiento inicial de 0.021 metros. Este ortomosaico muestra un flujo de trabajo común para crear mosaicos de ortoimágenes a partir de colección de imágenes previamente ajustadas. En el DSM, las áreas de color rojo representan una mayor altitud respecto al nivel del mar; mientras que las azules, una menor altitud.

Figura 3.14

Ortomosaico y el Modelo de Superficie Digital (DSM) dispersa antes de la densificación

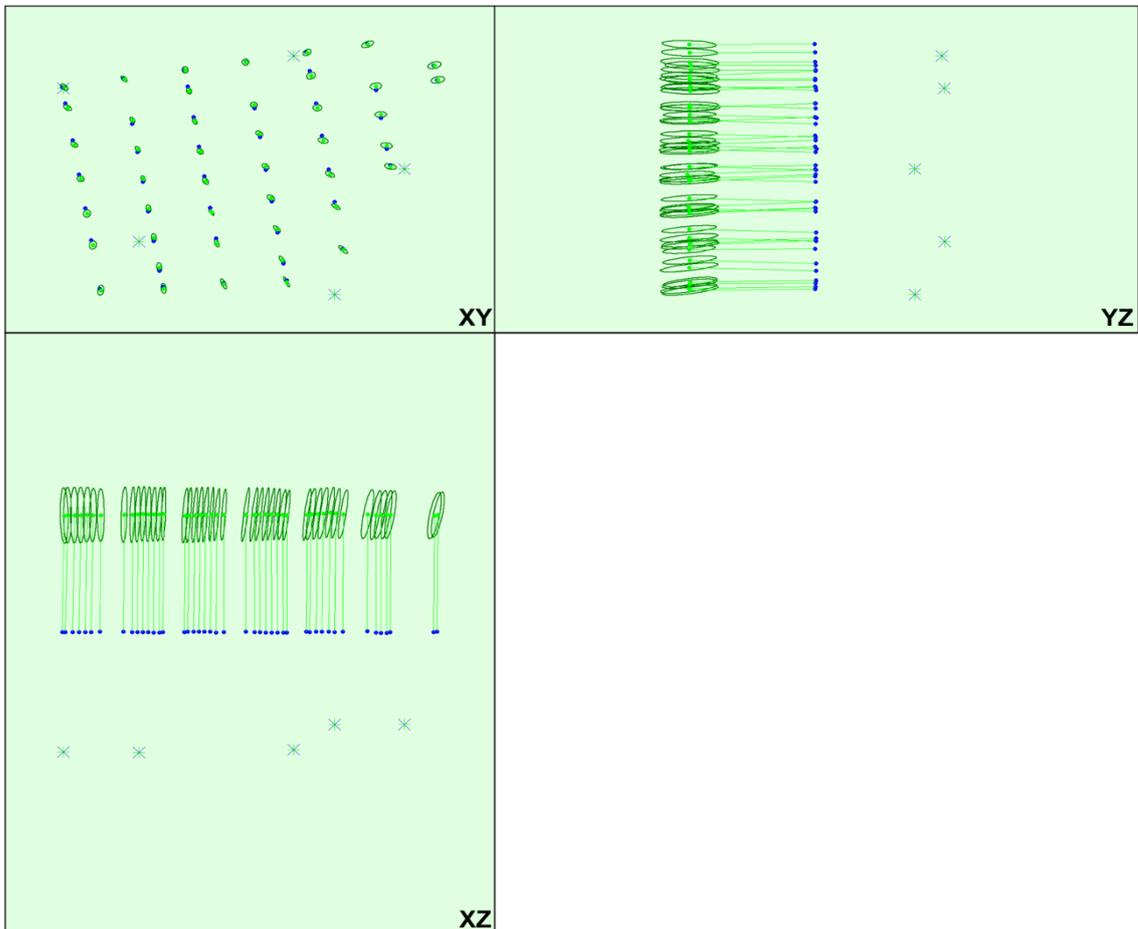


Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

La Figura 3.15 muestra el desplazamiento entre la posición de la imagen inicial con puntos de color azul, es decir, la ubicación de las fotografías según las coordenadas en que se voló el dron, y las posiciones calculadas con color verde, las cuales indican la posición en que el software intentó acomodar basándose en el registro de los puntos de control. También muestra el desplazamiento entre la posición inicial de los puntos de control (GCP's) junto con la posición calculada en la vista en planta en el plano XY, vista frontal en el plano XZ y vista de perfil en el plano YZ. Las elipses de color verde oscuro indican que tanto se ha tenido que mover la posición en las coordenadas para poder acomodar las imágenes a los puntos de control registrados.

Figura 3.15

Desplazamiento entre las posiciones de la imagen inicial (puntos azules) y calculadas (puntos verdes), así como el desplazamiento entre las posiciones iniciales de los GCP (cruces azules) y sus posiciones calculadas (cruces verdes)

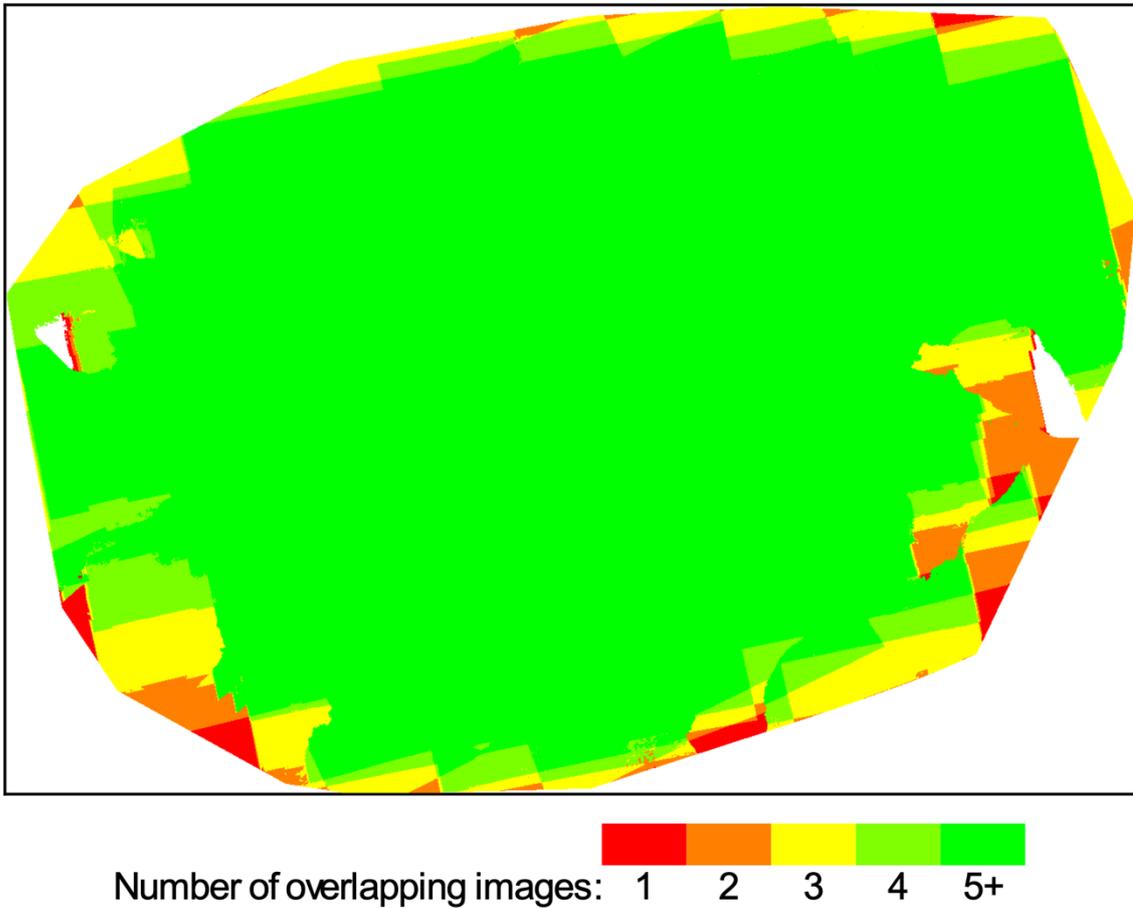


Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

La Figura 3.16 muestra el número de imágenes superpuestas, donde las zonas de color verde fosforescente representan que hay información más confiable con una superposición de más de 5 imágenes por cada píxel, mientras que las zonas de color rojo y amarillo representan información poco confiable por tener un solapamiento bajo.

Figura 3.16

Número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico

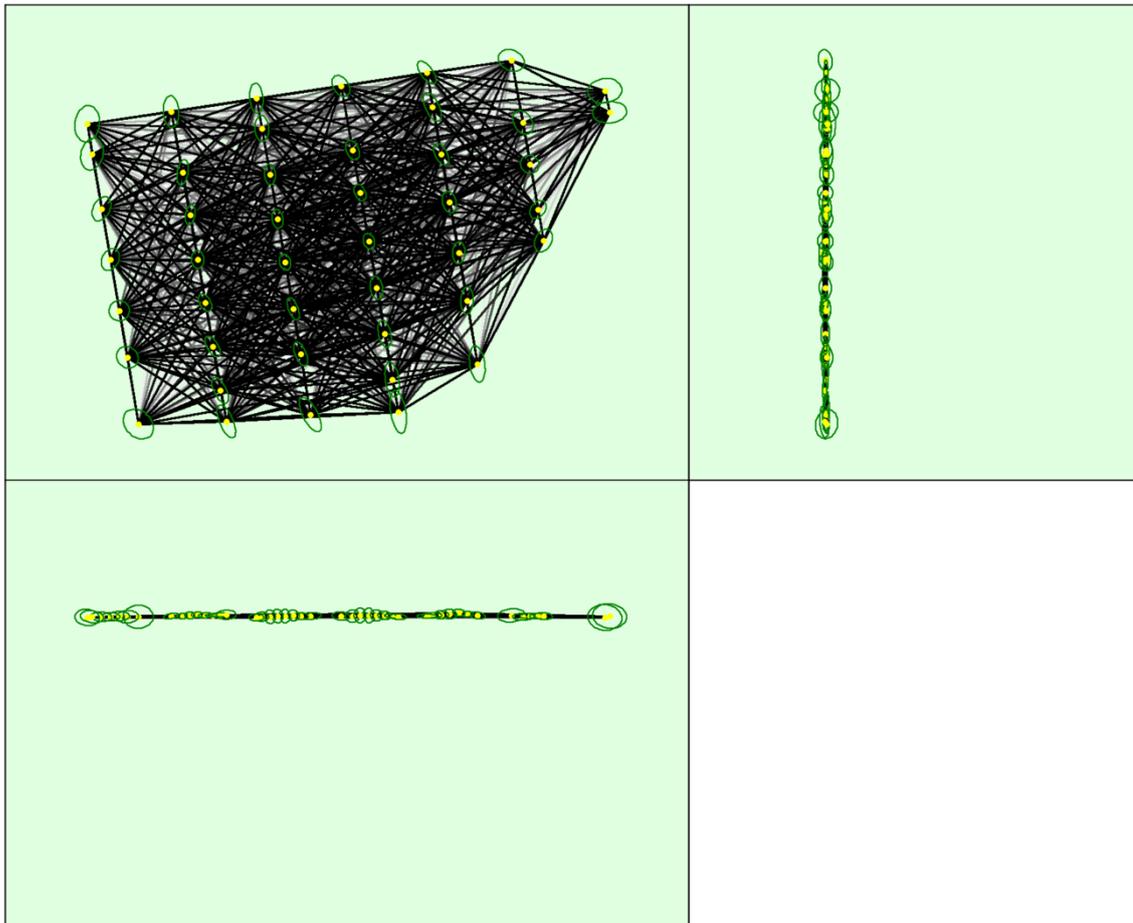


Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

La Figura 3.17 muestra la posición de la imagen previamente calculada con vínculos existentes entre imágenes que coinciden. La lineal oscura dentro de los enlaces nos muestra el número de puntos clave 2D que coinciden con las imágenes. Los enlaces de mayor brillo nos indican enlaces débiles que requieren de un enlace manual o tal vez mayor número de imágenes. Las elipses verdes oscuras nos indica que existe una incertidumbre relativa de la posición con la cámara y el resultado.

Figura 3.17

Coincidencias de puntos clave 2D



Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Pix4D, la Tabla 3.6 muestra: “La precisión de localización por GCP y errores medios en las tres direcciones de coordenadas. La última columna cuenta el número de imágenes calibradas en las que el GCP se ha verificado automáticamente frente a las marcadas manualmente”.

Tabla 3.6*Precisión de localización por punto de control (GCP) y errores medios*

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
A (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	0.006	0.032	0.474	5 / 5
B (3D)	0.020/ 0.020	0.017	-0.000	-0.076	0.790	5 / 5
E (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	-0.011	0.067	0.716	5 / 5
F (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	0.008	-0.023	0.533	5 / 5
H (3D)	0.020/ 0.020	0.003	-0.001	-0.020	0.608	5 / 5
Mean [m]		0.000807	0.000063	-0.004170		
Sigma [m]		0.008598	0.006477	0.049370		
RMS Error [m]		0.008636	0.006478	0.049546		

Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

La Tabla 3.7 muestra que el procesamiento de la densificación de la nube de puntos se realizó en una escala de 1/2, es decir la mitad del tamaño de imagen original, con una densidad de puntos alta y con un requerimiento de 3 coincidencias como mínimo. La densificación de la nube de puntos tuvo una duración de 42 minutos y 24 segundos y la generación de mallas texturizadas 3D se realizó en 6 minutos con 15 segundos. Los resultados generales de este procesamiento fueron 1 mosaico generado, 21,345,326 puntos densificados 3D y una densidad promedio de 435.85 m³.

Tabla 3.7*Detalles de la densificación de la nube de puntos*

Processing Options	
Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	High (Slow)
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	42m:24s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	06m:15s
Results	
Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	21345326
Average Density (per m ³)	435.85

Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

La Tabla 3.8 muestra los detalles del Modelo de Superficie Digital (DSM), ortomosaico e índice, donde se observa que la generación del DSM se realizó en 11 minutos con 48 segundos y la generación del ortomosaico en 7 minutos con 16 segundos.

Tabla 3.8*Detalles de Modelo de Superficie Digital (DSM), ortomosaico e índice*

Processing Options	
DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2.73 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: yes
Grid DSM	Generated: yes, Spacing [cm]: 100
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (2.73 [cm/pixel])
Contour Lines Generation	Generated: yes Contour Base [m]: 0 Elevation Interval [m]: 1 Resolution [cm]: 100 Minimum Line Size [vertices]: 20
Time for DSM Generation	11m:48s
Time for Orthomosaic Generation	07m:16s
Time for DTM Generation	01m:15s
Time for Contour Lines Generation	01s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Nota. Obtenido del Quality Report de Pix4D

3.2.2 ContextCapture (Bentley)

Para el procesamiento de datos en este software, como muestra la Figura 3.18, se siguieron los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo proyecto mediante la opción “New Project”.
2. Dentro del nuevo proyecto, en la pestaña “Photos”, añadir las fotografías obtenidas del dron.
3. En la pestaña “Surveys”:
 - Importar el archivo de las coordenadas de los puntos de control (GCP’s) y si hay check points (CP’s), también. El archivo debe tener los datos ordenados en el siguiente orden: Nombre, coordenada en X, coordenada en Y, coordenada en Z.

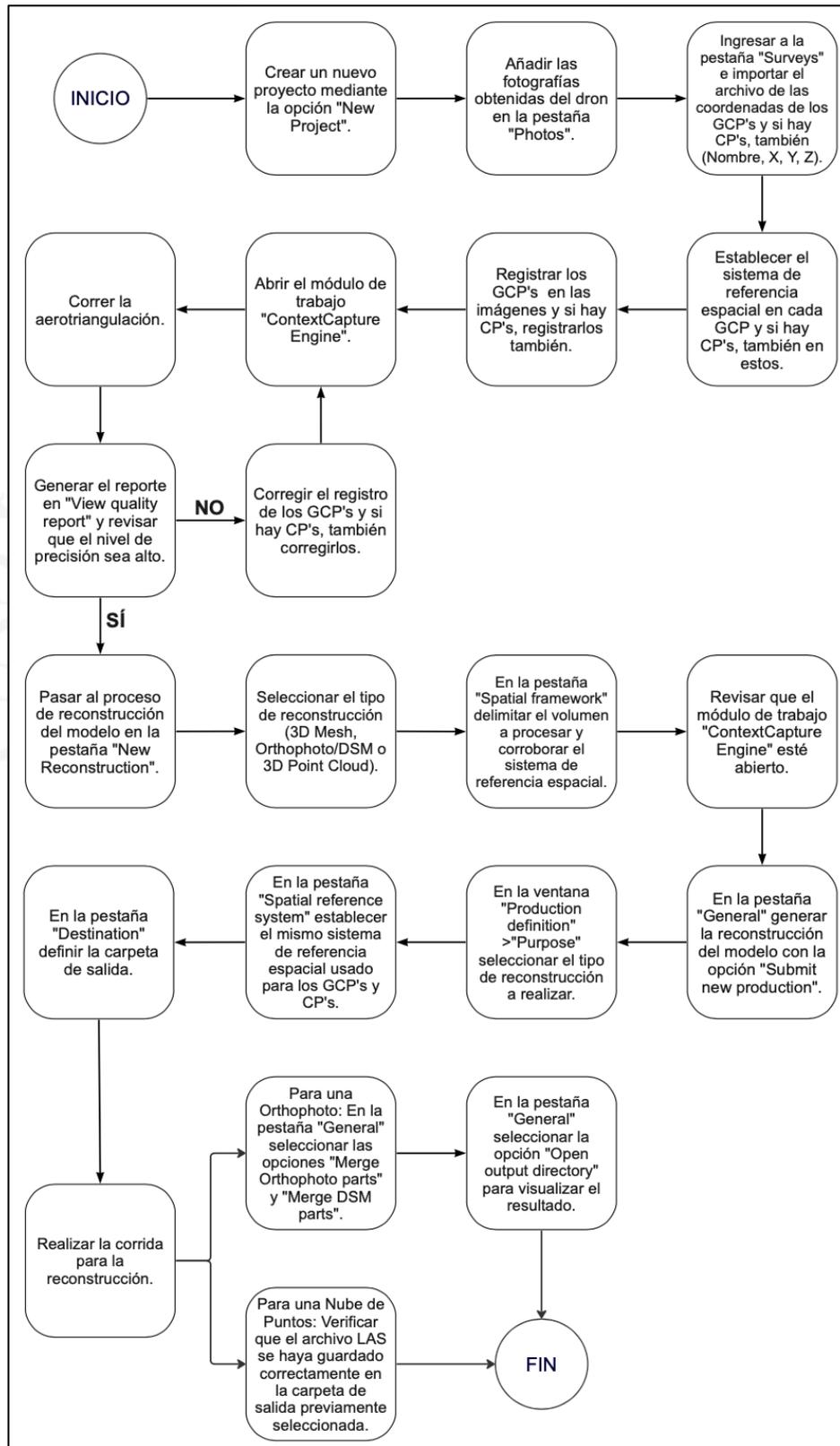
- Establecer el sistema de referencia espacial en cada punto de control (GCP) y si hay check point (CP's), también. En este caso se utilizó el sistema WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG: 32718).
 - Registrar manualmente los puntos de control (GCP's) y check points (CP's) en las fotografías. Por lo menos, 3 GCP's (Ground Control Points) en 2 imágenes.
4. Abrir el módulo de trabajo "ContextCapture Engine", el cual se ejecuta en segundo plano sin necesidad de que el usuario interactúe en este.
 5. Correr la aerotriangulación.
 6. Abrir y revisar el reporte que se genera como resultado de la aerotriangulación, buscando que el nivel de precisión sea alto. Si no se obtiene el nivel de precisión requerido, regresar al paso 3 y corregir el registro de los puntos. El software le indica las correcciones en cada fotografía con una simbología de cruz azul oscuro (+). Repetir este paso hasta que se obtenga un nivel de precisión alto.
 7. Pasar al proceso de reconstrucción del modelo en la pestaña "New Reconstruction".
 8. Seleccionamos el tipo de reconstrucción que deseamos (3D Mesh, Orthophoto/DSM o 3D Point Cloud).
 9. Ingresar a la pestaña "Spatial framework", delimitar el volumen a procesar y corroborar el sistema de referencia espacial. Para este caso sería WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG: 32718).
 10. Corroborar que el módulo de trabajo "ContextCapture Engine" esté funcionando en segundo plano, sino abrirlo.
 11. Generar la reconstrucción del modelo con la opción "Submit new production" en la pestaña "General".
 12. Dentro de la ventana "Production definition":
 - Seleccionar el tipo de reconstrucción a realizar (3D Mesh, Orthophoto/DSM o 3D Point cloud) en la sección "Purpose".
 - En la pestaña "Spatial reference system", establecer el mismo sistema de referencia espacial usado para los puntos de control en el paso 3.
 - Definir la carpeta de salida en la pestaña "Destination".
 13. Realizar la corrida para la reconstrucción:
 - Para una Orthophoto: En la pestaña "General", seleccionar las opciones "Merge Orthophoto parts" y "Merge DSM parts". Luego, en la misma pestaña seleccionar la opción "Open output directory" para visualizar el resultado.

- Para una Nube de puntos: Verificar que el archivo LAS se haya guardado correctamente en la carpeta de salida previamente seleccionada.



Figura 3.18

Procesamiento mediante el software ContextCapture (Bentley)



Nota. Elaboración propia

3.2.2.1 Reporte general del procesamiento

ContextCapture nos genera un reporte general llamado “Quality Report”, donde se puede visualizar un resumen de las especificaciones del proyecto, la posición de las fotografías, la coincidencia de fotografías, encuestas y los puntos de control.

Para el día 04 de agosto de 2020, se realizaron 5 procesamientos en total hasta alcanzar el nivel de precisión requerido (alto) con 8 puntos de control, como lo muestra la Tabla 3.9.

Tabla 3.9
Especificaciones generales de los procesamientos

Nº Procesamiento	1	2	3	4	5
Calidad de fotografías (%)	100	100	100	100	100
Píxel de la cámara (mm)	27.2404	27.2313	27.2332	27.2326	27.2332
Área cubierta (m ²)	73,689	73,689	73,689	73,689	73,689
Tiempo de procesamiento	2 min 58 s	55 s	55 s	55 s	55 s
Cantidad imágenes calibradas	45	45	45	45	45
Puntos claves por imagen	37,527	37,527	37,527	37,527	37,527
Error de reproyección (píxeles)	0.84	0.77	0.76	0.76	0.76

Nota. Elaboración propia

Las Tablas 3.10 a 3.14 muestran el resultado del nivel de precisión de los puntos de control de los cinco procesamientos realizados.

Tabla 3.10*Nivel de precisión de los puntos de control del Primer Procesamiento*

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
A	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	3.9	0.1027	0.0959	X: 0.0023; Y: -0.0787	0.0548	⚠
B	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	3.67	0.1118	0.083	X: -0.0733; Y: -0.0218	-0.0322	⚠
E	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	4.15	0.1236	0.1111	X: -0.0727; Y: 0.0808	-0.0226	⚠
F	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	3.23	0.0815	0.0835	X: 0.0331; Y: 0.0767	-0.0012	⚠
H	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	4.11	0.136	0.1101	X: 0.0986; Y: -0.0457	-0.0175	⚠
Global RMS				3.83	0.1127	0.0975	X: 0.0655; Y: 0.0651	0.0312	
Median				3.9	0.1118	0.0959	X: 0.0023; Y: -0.0218	-0.0175	

Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

En la Tabla 3.10 se pueden visualizar 5 puntos de control con niveles de precisión bajo (color rojo), esto quiere decir que hay mucho error. Como consecuencia, se corrigieron los puntos de control de cada fotografía como se explica en 3.2.2 Paso 6.

Tabla 3.11*Nivel de precisión de los puntos de control del Segundo Procesamiento*

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
A	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.95	0.0529	0.0234	X: -0.0102; Y: -0.0123	0.0171	✓
B	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.79	0.0876	0.0104	X: -0.0043; Y: -0.0028	-0.009	✓
E	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	1.24	0.0591	0.0308	X: -0.0185; Y: 0.0207	-0.0133	⚠
F	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	1.08	0.051	0.0267	X: 0.0118; Y: 0.0152	-0.0186	⚠
H	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	1.04	0.0873	0.0221	X: 0.0167; Y: -0.0131	-0.0062	⚠
Global RMS				1.03	0.0696	0.0237	X: 0.0133; Y: 0.0141	0.0137	
Median				1.04	0.0591	0.0234	X: -0.0043; Y: -0.0028	-0.009	

Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

En la Tabla 3.11 se pueden visualizar 3 puntos de control con niveles de precisión medio (color amarillo) y 2 puntos de control con nivel alto (color verde), esto quiere decir que el error es medio. Como consecuencia, se corrigieron los puntos de control de cada fotografía como se explica en 3.2.2 Paso 6.

Tabla 3.12

Nivel de precisión de los puntos de control del Tercer Procesamiento

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
A	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.77	0.0471	0.0121	X: -0.0077; Y: -0.0065	0.0068	✓
B	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.7	0.0883	0.0085	X: 0.0009; Y: -0.0028	-0.008	✓
E	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.83	0.05	0.0224	X: -0.0111; Y: 0.0149	-0.0124	✓
F	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.81	0.0504	0.0222	X: 0.0077; Y: 0.0052	-0.0201	✓
H	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.64	0.0847	0.0118	X: 0.008; Y: -0.0077	-0.0041	✓
Global RMS				0.75	0.0667	0.0164	X: 0.0078; Y: 0.0085	0.0117	
Median				0.77	0.0504	0.0121	X: 0.0009; Y: -0.0028	-0.008	

Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

Tabla 3.13*Nivel de precisión de los puntos de control del Cuarto Procesamiento*

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
A	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.68	0.0511	0.0098	X: -0.0074; Y: -0.0052	0.0038	✓
B	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.67	0.0902	0.0042	X: 0.0027; Y: -0.0006	-0.0031	✓
E	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.72	0.0473	0.0216	X: -0.0106; Y: 0.0119	-0.0147	✓
F	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.77	0.0523	0.0201	X: 0.0078; Y: 0.0042	-0.018	✓
H	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.58	0.0841	0.0091	X: 0.0059; Y: -0.0066	-0.0021	✓
Global RMS				0.69	0.0675	0.0146	X: 0.0074; Y: 0.0068	0.0106	
Median				0.68	0.0523	0.0098	X: 0.0027; Y: -0.0006	-0.0031	

Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

En la Tabla 3.12 y Tabla 3.13 se pueden visualizar los 5 puntos de control con nivel alto (color verde), esto quiere decir que el error es mínimo y la precisión es alta. Sin embargo, al revisar los puntos de control dentro del procesamiento (3.2.2 Paso 6) aún se encuentra en algunos registros de fotografías precisiones medias (color amarillo), por lo que se seguirán corrigiendo hasta obtener todos los registros con una precisión alta (color verde).

Tabla 3.14*Nivel de precisión de los puntos de control del Quinto Procesamiento*

Control Points Errors									
Name	Category	Accuracy [meters]	Number of Calibrated Photos	RMS of Reprojection Error [pixels]	RMS of Distances to Rays [meters]	3D Error [meters]	Horizontal Error [meters]	Vertical Error [meters]	
A	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.7	0.0513	0.0104	X: -0.0078; Y: -0.0053	0.0044	✓
B	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.67	0.0905	0.0041	X: 0.0028; Y: -0.0004	-0.003	✓
E	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.72	0.0473	0.0213	X: -0.0101; Y: 0.0119	-0.0145	✓
F	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	5 (5 marked photos)	0.74	0.0518	0.0175	X: 0.008; Y: 0.0034	-0.0152	✓
H	3D	Horizontal: 0.02; Vertical: 0.02	6 (6 marked photos)	0.58	0.0844	0.0088	X: 0.0057; Y: -0.0063	-0.0023	✓
Global RMS				0.68	0.0676	0.0139	X: 0.0073; Y: 0.0067	0.0097	
Median				0.7	0.0518	0.0104	X: 0.0028; Y: -0.0004	-0.003	

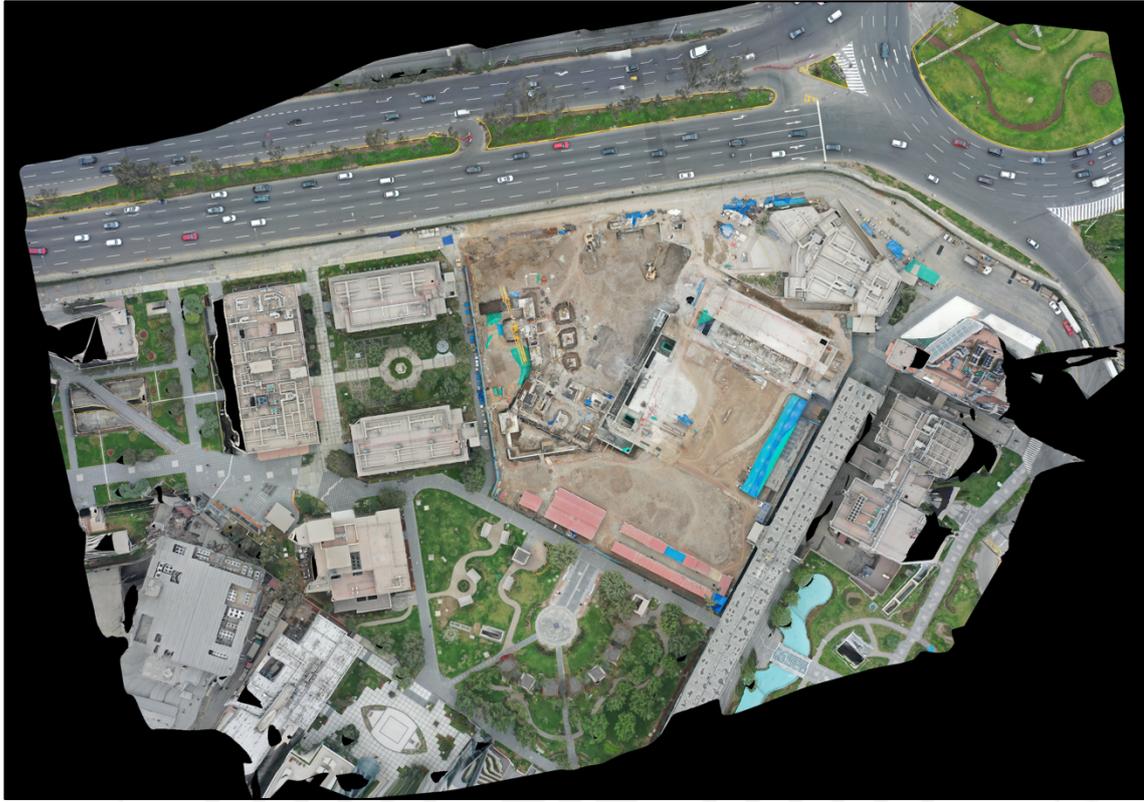
Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

En la Tabla 3.14 se puede visualizar los 5 puntos de control con nivel alto (color verde), esto quiere decir que el error es mínimo y la precisión es alta. Además, se revisaron los puntos de control dentro de cada fotografía y se corroboraron precisiones altas (color verde). Por lo tanto, se usarán los resultados de este último procesamiento para generar el ortomosaico y DSM.

La Figura 3.19 presenta el ortomosaico resultante del Quinto procesamiento, el cual tuvo un nivel de precisión alta en cada punto de control (GCP). En este ortomosaico se puede visualizar el estado de la obra en el día que se realizó el vuelo.

Figura 3.19

Ortomosaico del Quinto Procesamiento

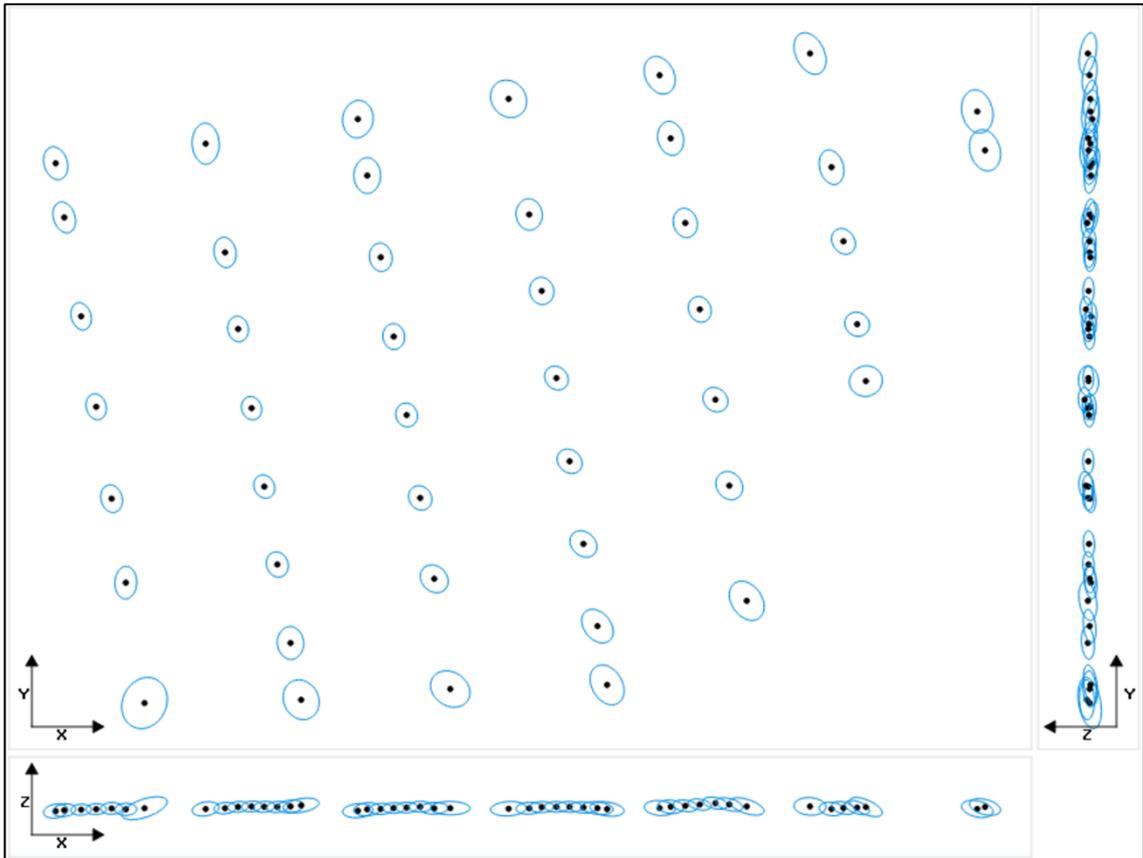


Nota. Elaboración propia mediante ContextCapture

La Figura 3.20 muestra las posiciones de las fotografías del Quinto Procesamiento, en donde se utiliza una serie de métricas para definir las posiciones de las fotografías calculadas y para ayudar al usuario a identificar posibles errores de posicionamiento. Esta sección nos muestra que hasta que grado la optimización del software “ContextCapture” es de confiar con la posición que se estimó de la foto escogida. Se muestra que a mayor sea la elipse que está alrededor de la foto, su incertidumbre sea de mayor consideración.

Figura 3.20

Incertidumbres de las posiciones de las fotografías del Quinto Procesamiento



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

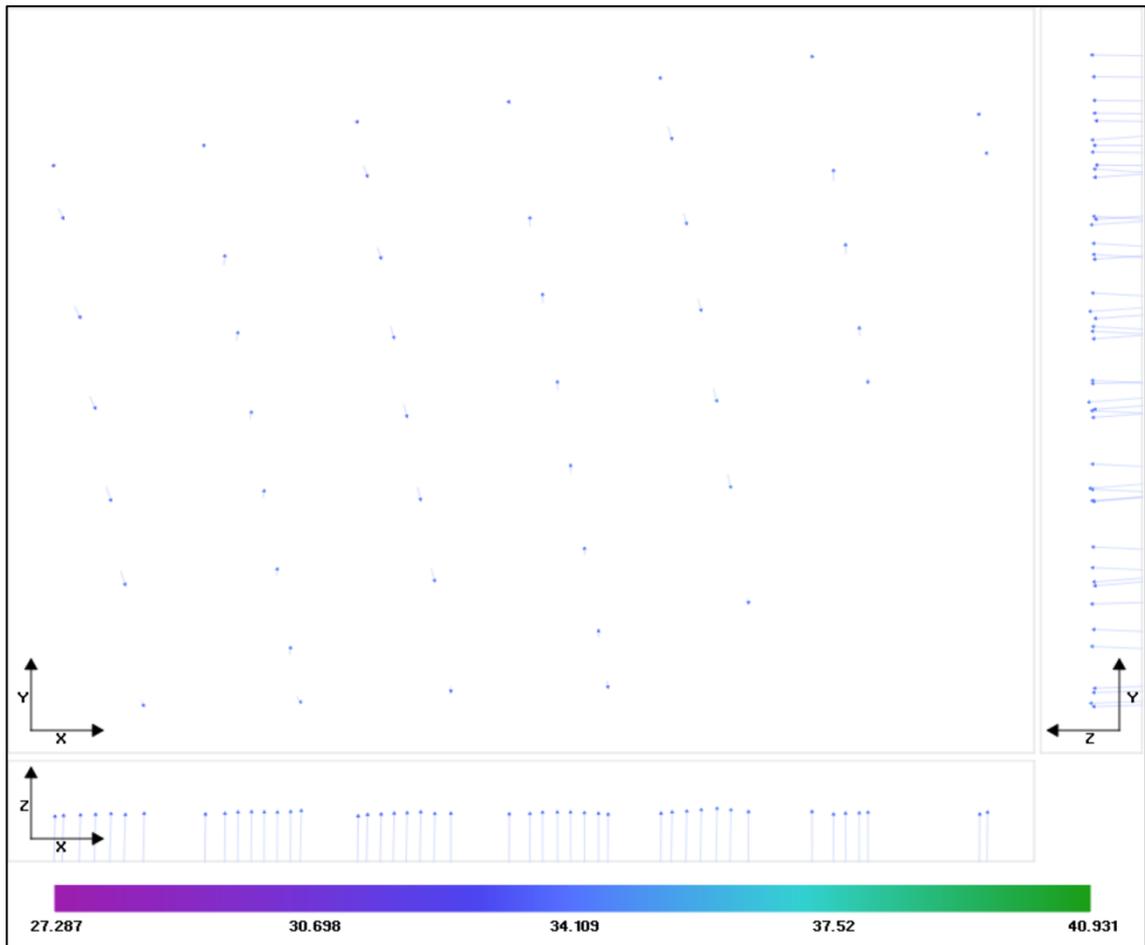
Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.20 muestra:

La vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ) de las posiciones de las fotografías calculadas (puntos negros). Las elipses azules indican incertidumbre de posición, escalada para legibilidad.

La Figura 3.21 muestra con la ayuda de colores y fechas la distancia existente entre los valores optimizados y las posiciones de entrada que fueron proporcionada por el usuario encargado, pero solo estará presente si las dichas posiciones de entrada son bien ingresadas.

Figura 3.21

Distancia de posición a los metadatos del Quinto Procesamiento



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.21 muestra:

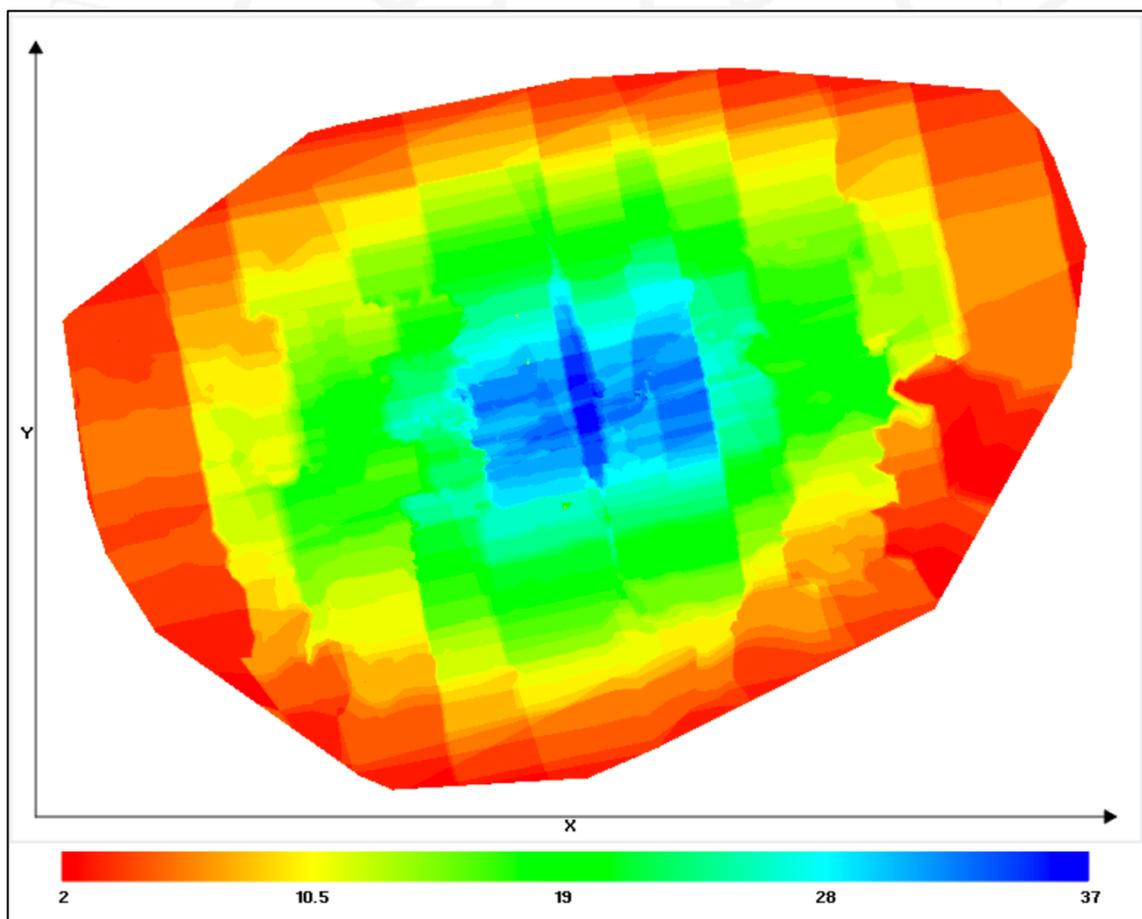
La vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ), con flechas que indican el conjunto entre las posiciones de los metadatos y las posiciones de las fotografías calculadas; todas las flechas comienzan desde las posiciones de los metadatos y apuntan hacia las posiciones calculadas (•). Por ejemplo, en la vista frontal, las posiciones calculadas se encuentran dónde están los puntos (•), las cuales están conectadas, respectivamente, a una línea recta (la distancia) que termina en las posiciones de los metadatos correspondientes (el final de la recta sin punto). Dado que

las fotos fueron tomadas perpendicularmente a la superficie del terreno, en la vista superior (vista en planta, XY) solo se observan puntos. Los puntos grises indican fotos sin calibrar que tienen metadatos. Los puntos rosados indican fotos calibradas que no tienen metadatos. Según la escala de colores, la cual está en metros, se obtuvo una distancia mínima de 33.4024 metros y una máxima de 34.8124 metros. La distancia de posición mediana es de 34.109 metros.

La Figura 3.22 grafica mediante colores la cantidad de fotos procesadas que se pueden observar con mayor potencialidad en cada área propuesta.

Figura 3.22

Número de fotos viendo la escena del Quinto Procesamiento



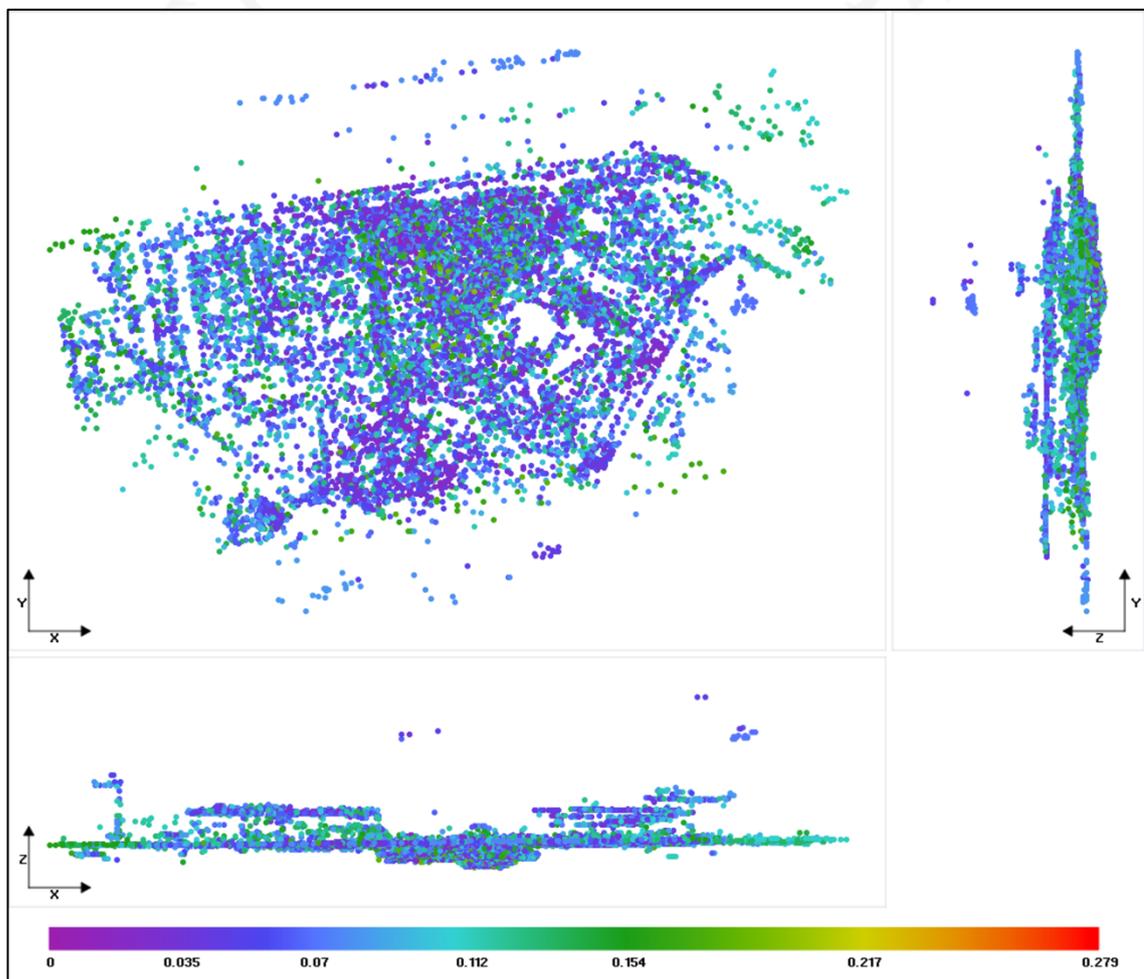
Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.22 muestra: “Visualización de la vista superior (plano XY) de la escena, con colores que indican la cantidad de fotos que potencialmente ven cada área”.

La Figura 3.23 representa visualmente la incertidumbre en la posición del punto de enlace individual.

Figura 3.23

Incertidumbres de posición del punto de enlace del Quinto Procesamiento



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

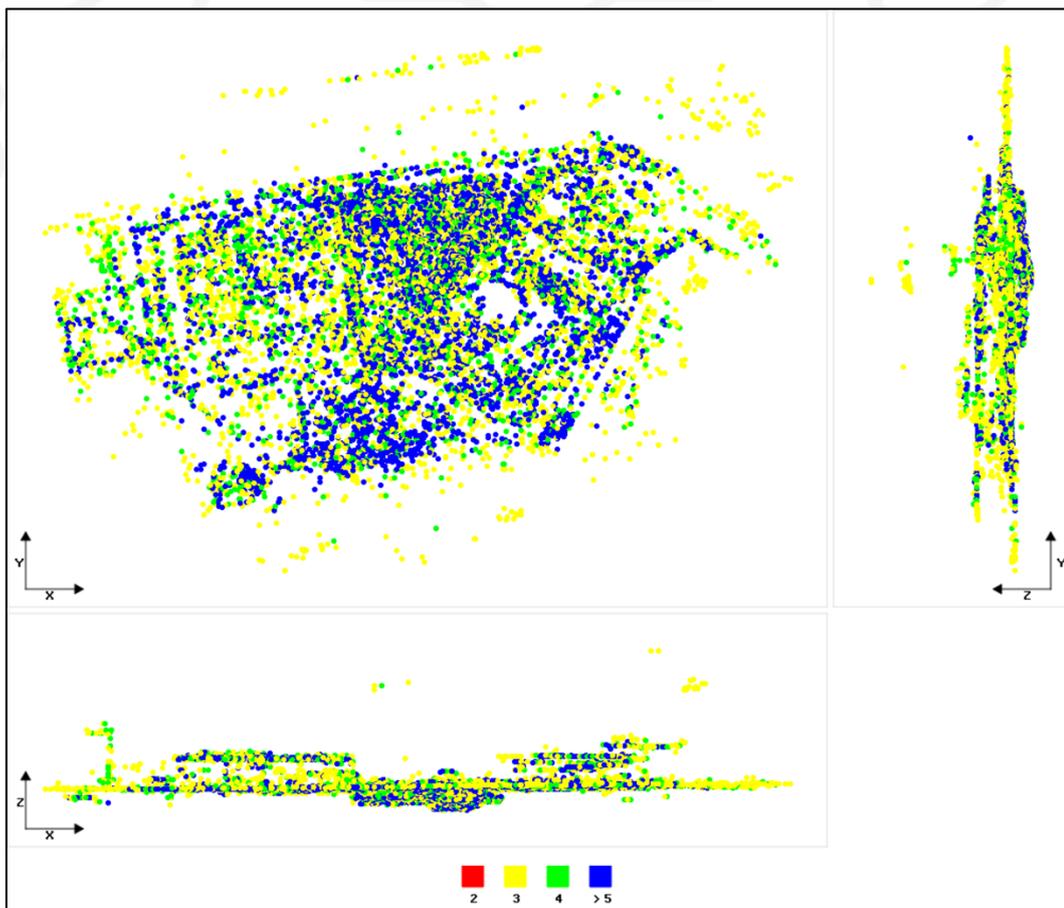
Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.23 muestra:

Visualizaciones de vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ) de todos los puntos de enlace, con colores que representan la incertidumbre en la posición del punto individual. Los valores están en metros, con una incertidumbre mínima de 0.0123 metros y máxima de 0.1973 metros. La incertidumbre de la posición mediana es igual a 0,0704 metros.

La Figura 3.24 grafica la observación de los puntos de unión que ilustra la cantidad de fotografías que se han utilizado para definir cada punto.

Figura 3.24

Número de observaciones por punto de enlace



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

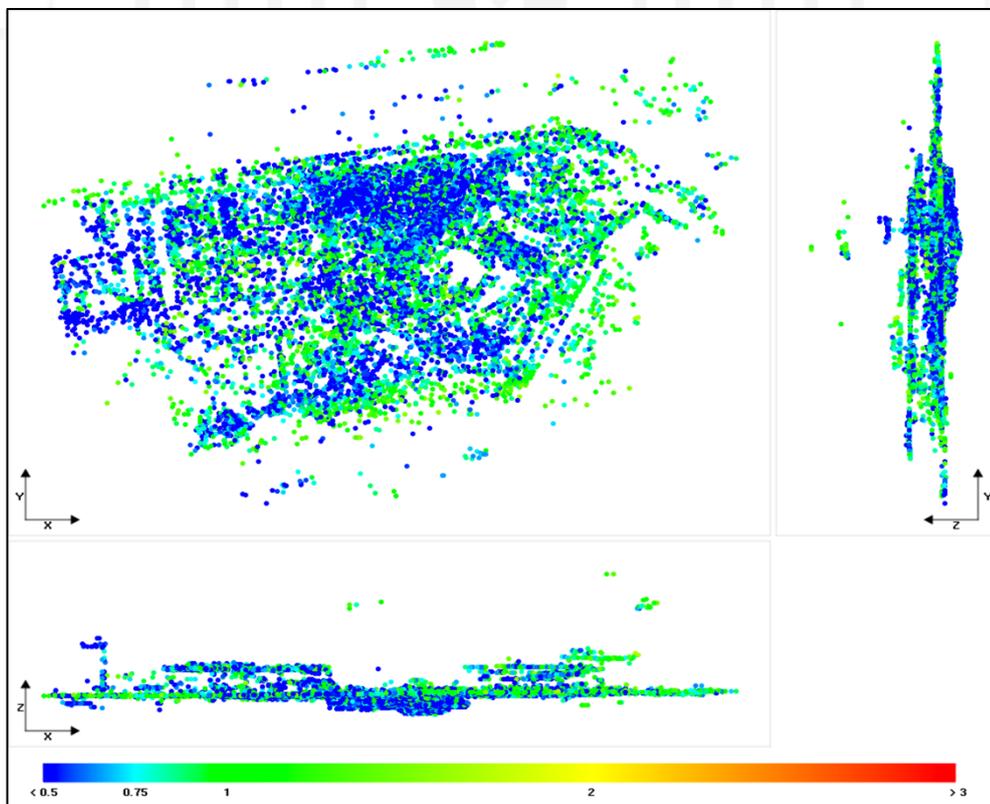
Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.24 muestra:

Visualizaciones de vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ) de todos los puntos de enlace, con colores que representan el número de fotos que se han utilizado para unir cada punto. El número mínimo de fotos por punto de empate es de 3 y el máximo es de 32. El número promedio de fotos observando un punto de empate es de 5.

La Figura 3.25 muestra el error de reproyección de píxeles para cada punto de enlace y muestra la representación gráfica de estos valores en una vista superior, lateral y frontal de la escena.

Figura 3.25

Errores de reproyección por punto de enlace



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

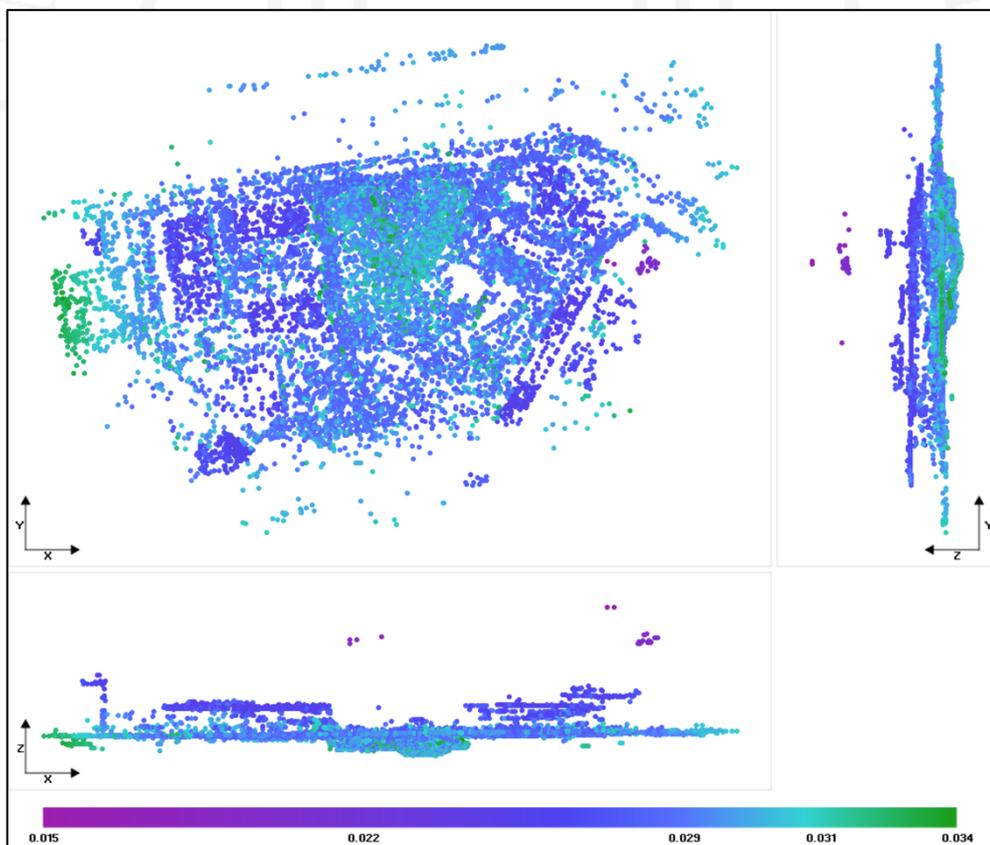
Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.25 muestra:

Visualizaciones de vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ) de todos los puntos de enlace, con colores que representan el error de reproyección en píxeles. El error mínimo de reproyección es de 0,05 píxeles y el máximo de 1,91 píxeles. El error medio de reproyección es de 0,68 píxeles.

La Figura 3.26 muestra la proyección de vista múltiple de todos los puntos de enlace, con colores que representan la resolución en la posición del punto individual.

Figura 3.26

Resolución del punto de enlace



Nota. Obtenido del Quality Report de ContextCapture

Según el Manual de ayuda del Reporte de Calidad de Bentley ContextCapture, la Figura 3.26 muestra:

Visualizaciones de vista superior (plano XY), vista lateral (plano ZY) y vista frontal (plano XZ) de todos los puntos de enlace, con colores que representan la resolución en la posición del punto individual. Los valores están en metros/píxel, con una resolución mínima de 0,0152 metros/píxel y máxima de 0,0341 metros/píxel. La resolución mediana es igual a 0,0285 metros/píxel.

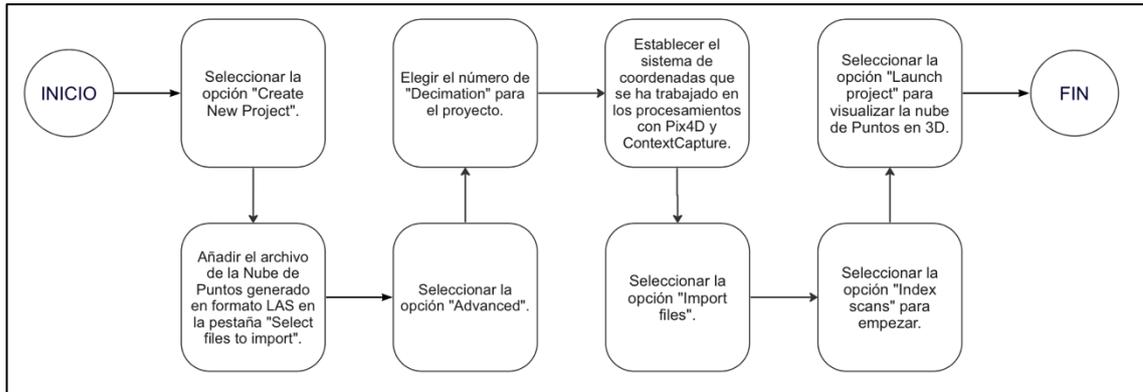
3.2.3 ReCap Autodesk

Para la creación 3D de las nubes de puntos en este software, como muestra la Figura 3.27, se siguieron los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo proyecto.
2. Importar el archivo de la nube de puntos obtenida previamente del procesamiento en un software de fotogrametría (Pix4D o ContextCapture).
3. Seleccionar la opción “Advanced”.
4. Elegir el número de “Decimation” para el proyecto, es decir, la distancia entre los puntos de la nube.
5. Establecer el sistema de referencia espacial. Para este caso sería WGS 84 / UTM zone 18S (EPSG: 32718).
6. Selección la opción “Import files”.
7. Seleccionar “Index scans”.
8. Seleccionar la opción “Launch Project” para visualizar la creación 3D de la nube de puntos.

Figura 3.27

Creación 3D de la nube de puntos de Pix4D con ReCap Autodesk



Nota. Elaboración propia

Las Figuras 3.28 y 3.29 muestran las creaciones en 3D de las nubes de puntos generadas por los softwares Pix4D y ContextCapture, respectivamente.

Figura 3.28

Creación 3D de la nube de puntos de Pix4D con ReCap Autodesk



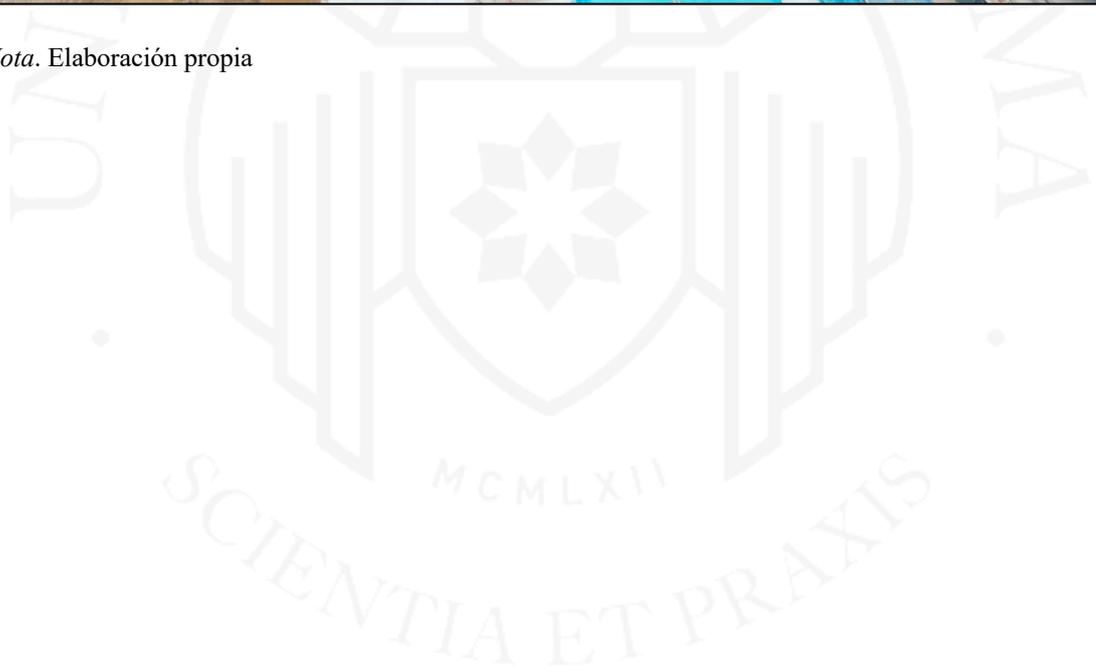
Nota. Elaboración propia

Figura 3.29

Creación 3D de la nube de puntos de ContextCapture con ReCap Autodesk



Nota. Elaboración propia



CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados del procesamiento con los softwares profesionales de fotogrametría se generaron del procesamiento de un vuelo por mes en un periodo de 12 meses en total. Se obtuvieron tomando en cuenta que los vuelos se hicieron a una altura de 100 metros, la calidad de las fotografías al 100% y un Accuracy (precisión) predeterminado de 0.02 metros en los puntos de control (GCP's) y check points, según sea el caso.

Para el cálculo de la desviación estándar se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Sigma} = \sigma = \sqrt{\frac{\sum(e_i - \mu)^2}{N}}$$

Donde, para nuestra investigación:

e_i : Error de cada punto por dirección (X, Y o Z)

μ : La media del conjunto de datos de cada punto por dirección (X, Y o Z)

N: Cantidad de puntos de control (GCP's)

4.1 Resultados del software Pix4D

Para generar los resultados mostrados en la Tabla 4.15 se calibraron un total de 637 fotografías a 100 metros de altura de vuelo y 12 quality reports, de los cuales se obtuvieron los siguientes promedios: 27.44 mm del tamaño del píxel de la cámara, 0.061 km² de área cubierta, 0.016 metros de error de reproyección (RMS), 0.0166 metros de desviación estándar (sigma) de los GCP's, 56,057 keypoints (puntos clave por imagen) y el tiempo de procesamiento fue de 1 hora 33 minutos 51 segundos. Además, se calibró un vuelo de 228 fotografías a 50 metros de altura y 1 quality report, del cual se obtuvo 27.2 mm del tamaño de píxel de la cámara, 0.159 km² de área cubierta, 0.036 metros de RMS, 0.0367 metros de desviación estándar de los GCP's, 50,404 keypoints y el tiempo de procesamiento fue de 8 horas 54 minutos 38 segundos.

Tabla 4.15*Resultados Pix4D*

Fecha	Cantidad de Quality reports generados	Cantidad de imágenes calibradas	Altura de vuelo (m)	Píxel de la cámara (mm)	Área cubierta (km ²)	Tiempo de procesamiento (s)	Cantidad de GCP's	Cantidad de check points	Cantidad de Keypoints (unidad)	RMS (m)	Sigma de los GCP's (m)
04/08/2020	1	45	100	27.3	0.052	4,595	5	0	52,371	0.021	0.0215
04/09/2020	1	45	100	27.2	0.052	4,953	5	0	56,048	0.020	0.0207
06/10/2020	1	48	100	27.8	0.057	5,084	5	0	56,360	0.021	0.0214
06/11/2020	1	47	100	27.2	0.054	4,777	4	0	53,276	0.009	0.0100
02/12/2020	1	47	100	27.2	0.054	5,058	4	0	52,230	0.002	0.0023
21/01/2021	1	47	100	27.4	0.056	5,020	4	0	53,762	0.015	0.0159
04/02/2021	1	47	100	27.1	0.055	5,016	4	0	52,440	0.022	0.0228
05/03/2021	1	35	100	27.7	0.052	3,657	4	0	57,786	0.010	0.0102
07/04/2021	1	69	100	27.4	0.074	7,462	5	0	57,173	0.016	0.0166
05/05/2021	1	69	100	27.6	0.075	7,630	5	0	54,735	0.017	0.0175
02/06/2021	1	69	100	27.1	0.074	7,175	5	0	62,563	0.013	0.0137
03/07/2021	1	69	100	27.1	0.074	7,144	6	3	63,943	0.026	0.0270
27/07/2021	1	228	50	27.2	0.159	32,078	6	3	50,404	0.036	0.0367

Nota. Elaboración propia mediante los datos obtenidos de los Quality Reports de Pix4D

4.2 Resultados del software ContexCapture

Para generar los resultados mostrados en la Tabla 4.16 se calibraron un total de 637 fotografías y 48 quality reports, de los cuales se obtuvieron los siguientes promedios: 27.23 mm del tamaño del píxel de la cámara, 0.081 km² de área cubierta, 0.009 metros de error de reproyección (RMS), 0.0094 metros de desviación estándar (sigma) de los GCP's, 38,769 keypoints (puntos clave por imagen) y el tiempo de procesamiento fue de 1 hora 13 minutos 59 segundos. Además, se calibró un vuelo de 229 fotografías a 50 metros de altura y 4 quality reports, del cual se obtuvieron 21.9 mm del tamaño de píxel de la cámara, 0.213 km² de área cubierta, 0.0002 metros de RMS, 0.0108 metros de desviación estándar de los GCP's, 34,447 keypoints y el tiempo de procesamiento fue de 3 horas 13 minutos 16 segundos.



Tabla 4.16*Resultados ContextCapture*

Fecha	Cantidad de Quality reports generados	Cantidad de imágenes calibradas	Altura de vuelo (m)	Píxel de la cámara (mm)	Área cubierta (km ²)	Tiempo de procesamiento (s)	Cantidad de GCP's	Cantidad de check points	Cantidad de keypoints	RMS (m)	Sigma de los GCP's (m)
04/08/2020	5	45	100	27.2	0.074	4,383	5	0	37,527	0.0002	0.0072
04/09/2020	6	45	100	27.1	0.072	4,663	5	0	40,031	0.0085	0.0078
06/10/2020	3	48	100	27.6	0.076	3,837	5	0	38,687	0.0098	0.0098
06/11/2020	3	47	100	27.0	0.074	3,877	4	0	36,025	0.0098	0.0097
02/12/2020	4	47	100	27.1	0.076	4,127	4	0	35,400	0.0086	0.0081
21/01/2021	3	47	100	27.3	0.075	3,877	4	0	37,158	0.0121	0.0105
04/02/2021	3	47	100	27.1	0.074	3,891	4	0	36,350	0.0085	0.0079
05/03/2021	5	35	100	27.5	0.070	3,985	4	0	40,433	0.0104	0.0103
07/04/2021	3	69	100	27.4	0.096	4,795	5	0	40,178	0.0120	0.0119
05/05/2021	3	69	100	27.4	0.097	4,456	5	0	38,344	0.0096	0.0089
02/06/2021	4	69	100	27.0	0.095	5,277	5	0	42,519	0.0109	0.0105
03/07/2021	6	69	100	27.0	0.093	6,100	6	3	42,576	0.0102	0.0098
27/07/2021	4	229	50	21.9	0.213	11,596	6	3	34,447	0.0002	0.0108

Nota. Elaboración propia mediante los datos obtenidos de los Quality Reports de ContextCapture - Bentley

La Tabla 4.17 muestra los parámetros de tiempo de procesamiento y la precisión obtenidos en cada software respectivamente.

Tabla 4.17

Comparación de resultados de los softwares

Software	Altura de vuelo (m)	Tiempo de procesamiento	Precisión (m)
Pix4D	100	1h 33min 51s	± 0.0166
Pix4D	50	8h 54min 38s	± 0.0367
ContextCapture – Bentley	100	1h 13min 59s	± 0.0094
ContextCapture - Bentley	50	3h 13min 16s	± 0.0108

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 4.17, para el periodo desde agosto de 2020 hasta julio de 2021, con Pix4D se obtuvieron tiempos aproximados de 1 hora y media para vuelos a 100 metros de altura y 9 horas para vuelos a 50 metros de altura, mientras que con ContextCapture se obtuvo aproximadamente 1 hora 15 minutos para vuelos a 100 metros de altura y 3 horas 15 minutos para vuelos a 50 metros de altura. Por otro lado, tomando como referencia el modelo As-Built, la precisión mediante el software Pix4D para vuelos a 100 y 50 metros es ± 0.0166 y ± 0.0367 metros, respectivamente, mientras que en ContextCapture es ± 0.0094 y ± 0.0108 metros, respectivamente.

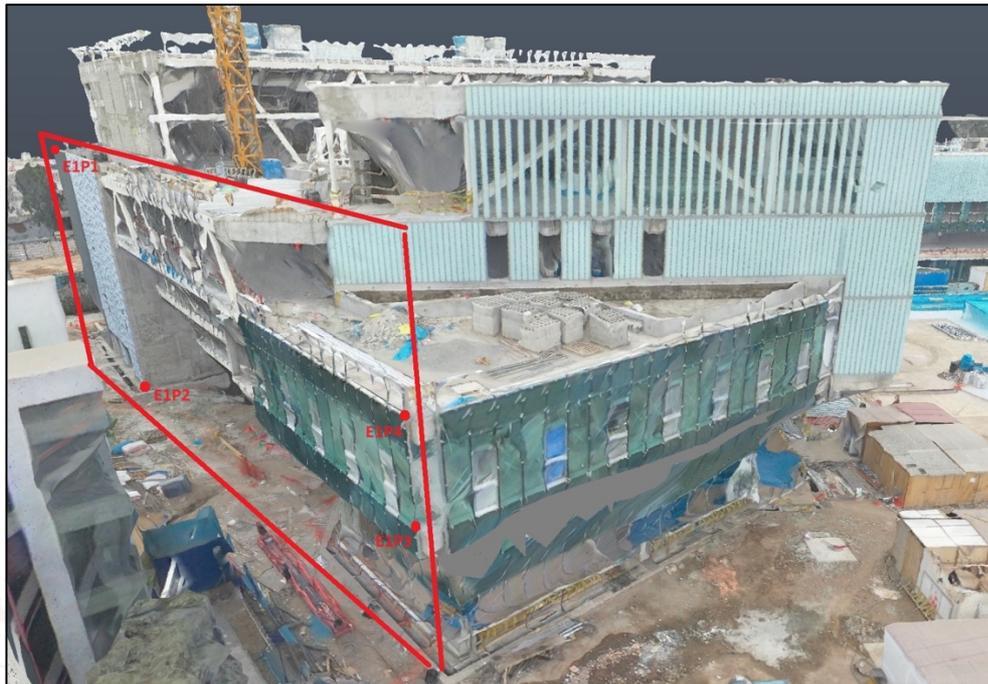
4.3 Resultados entre el modelo As-Built y los softwares Pix4D y ContextCapture

Para la siguiente comparación se tomaron en cuenta los datos del vuelo a 50 metros de altura realizado el 27 de julio de 2021, de los cuales se generó una nube de puntos correspondientemente en Pix4D y ContextCapture.

Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran 2 elevaciones elegidas del proyecto de las cuales se seleccionaron 4 puntos de cada una obteniendo sus coordenadas en 3 direcciones: X, Y, Z.

Figura 4.30

Elevación 1 del Pabellón “F1” de la Universidad de Lima



Nota. Elaboración propia mediante el software ReCap Autodesk

Figura 4.31

Elevación 2 del Pabellón “F1” de la Universidad de Lima



Nota. Elaboración propia mediante el software ReCap Autodesk

Las Tablas 4.18 a 4.23 muestran las coordenadas WGS 84 / UTM zone 18S extraídas del modelo As-Built y de las nubes de puntos generadas mediante los softwares Pix4D y ContextCapture.

Tabla 4.18

Coordenadas Elevación 1 – Modelo As-Built

Puntos	Coordenada		
	Dirección X (m)	Dirección Y (m)	Dirección Z (m)
AB.E1P1	285,408.5847	8,663,392.0722	219.73
AB.E1P2	285,411.1867	8,663,374.6656	203.86
AB.E1P3	285,417.9042	8,663,331.0797	211.73
AB.E1P4	285,417.9462	8,663,331.1366	215.73

Nota. Elaboración propia

Tabla 4.19

Coordenadas Elevación 2 – Modelo As-Built

Puntos	Coordenada		
	Dirección X (m)	Dirección Y (m)	Dirección Z (m)
AB.E2P1	285,444.0054	8,663,332.7968	225.4689
AB.E2P2	285,444.0025	8,663,332.8112	210.5100
AB.E2P3	285,472.6490	8,663,395.5101	211.7300
AB.E2P4	285,473.0438	8,663,395.3610	219.8617

Nota. Elaboración propia

Tabla 4.20

Coordenadas Elevación 1 – Nube de puntos Pix4D

Puntos	Coordenada		
	Dirección X (m)	Dirección Y (m)	Dirección Z (m)
4D.E1P1	285,408.745	8,663,392.171	219.422
4D.E1P2	285,411.270	8,663,374.913	203.323
4D.E1P3	285,417.965	8,663,331.268	210.715
4D.E1P4	285,417.956	8,663,331.370	214.735

Nota. Elaboración propia

Tabla 4.21*Coordenadas Elevación 2 – Nube de puntos Pix4D*

Puntos	Coordenada Dirección X (m)	Coordenada Dirección Y (m)	Coordenada Dirección Z (m)
4D.E2P1	285,444.203	8,663,332.844	224.236
4D.E2P2	285,444.202	8,663,332.858	210.549
4D.E2P3	285,472.967	8,663,395.607	210.526
4D.E2P4	285,473.223	8,663,395.334	218.661

Nota. Elaboración propia**Tabla 4.22***Coordenadas Elevación 1 – Nube de puntos ContextCapture*

Puntos	Coordenada Dirección X (m)	Coordenada Dirección Y (m)	Coordenada Dirección Z (m)
CC.E1P1	285,408.680	8,663,392.096	219.334
CC.E1P2	285,411.29	8,663,374.622	202.747
CC.E1P3	285,417.927	8,663,331.125	210.642
CC.E1P4	285,417.919	8,663,331.357	214.567

Nota. Elaboración propia**Tabla 4.23***Coordenadas Elevación 2 – Nube de puntos ContextCapture*

Puntos	Coordenada Dirección X (m)	Coordenada Dirección Y (m)	Coordenada Dirección Z (m)
CC.E2P1	285,444.196	8,663,332.853	224.103
CC.E2P2	285,444.195	8,663,332.864	210.551
CC.E2P3	285,472.976	8,663,395.455	210.489
CC.E2P4	285,473.188	8,663,395.410	218.584

Nota. Elaboración propia

Las Tablas 4.24 y 4.25 muestran los errores de los puntos tomados por elevación obtenidos por cada software comparándolos con el modelo As-Built en cada dirección (X, Y, Z), respectivamente.

Tabla 4.24

Errores en cada dirección – Nube de puntos Pix4D

Puntos	Error	Error	Error
	Dirección X (m)	Dirección Y (m)	Dirección Z (m)
4D.E1P1	0.1603	0.0988	-0.3080
4D.E1P2	0.0833	0.2474	-0.5370
4D.E1P3	0.0608	0.1883	-1.0150
4D.E1P4	0.0098	0.2334	-0.9950
4D.E2P1	0.1976	0.0472	-1.2329
4D.E2P2	0.1995	0.0468	0.0390
4D.E2P3	0.3180	0.0969	-1.2040
4D.E2P4	0.1792	-0.0270	-1.2007

Nota. Elaboración propia

Tabla 4.25

Errores en cada dirección – Nube de puntos ContextCapture

Puntos	Error	Error	Error
	Dirección X (m)	Dirección Y (m)	Dirección Z (m)
CC.E1P1	0.0953	0.0238	-0.3960
CC.E1P2	0.1033	-0.0436	-1.1130
CC.E1P3	0.0228	0.0453	-1.0880
CC.E1P4	-0.0272	0.2204	-1.1630
CC.E2P1	0.1906	0.0562	-1.3659
CC.E2P2	0.1925	0.0528	0.0410
CC.E2P3	0.3270	-0.0551	-1.2410
CC.E2P4	0.1442	0.0490	-1.2777

Nota. Elaboración propia

La Tabla 4.26 muestra la desviación estándar obtenida de los softwares comparados con el modelo As-Built en cada dirección.

Tabla 4.26*Desviación estándar en cada dirección según software*

Software	Desviación estándar Dirección X (m)	Desviación estándar Dirección Y (m)	Desviación estándar Dirección Z (m)
Pix4D	0.097	0.098	0.480
ContextCapture	0.110	0.084	0.499

Nota. Elaboración propia

Como muestran los resultados presentados la precisión obtenida, en contraste con el modelo As-Built, es ± 0.225 metros con el software Pix4D y ± 0.231 con el software ContextCapture.

4.4 Los aportes de esta investigación al ODS 9

Los datos presentados en la Tabla 4.27 demostraron vincular estrategias, procesos y técnicas científicas para apoyar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de la industria fomentando la innovación y la resiliencia ingenieril frente a los desafíos de la meta 9.5 y 9.b del ODS 9, tomando como referencia el pabellón “F1” de la Universidad de Lima.

Para esta tesis se utilizaron herramientas como drones para la recolección de datos mediante fotografías y softwares de fotogrametría profesional; lo que generó un incentivo, como consecuencia, a capacitarnos e investigar sobre el uso y procedimientos de estas tecnologías. Con esta tesis se prevé fortalecer las buenas prácticas de los proyectos de construcción y sus stakeholders a través de la integración de diferentes herramientas, políticas y estrategias con potencial de reapplicarlo a nivel local y global.

Tabla 4.27

Oportunidades de reaplicación multilateral de los métodos y resiliencia de esta investigación a la meta 9.5 y 9.b del ODS 9

AMBITO	ODS	META ODS	INICIATIVA /PROCESO PROPUESTO	STAKEHOLDERS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO	IMPACTOS ESTIMADOS
Económico	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.	Con las simulaciones en As-Built y fotogrametría se disminuyen los retrabajos por lo tanto se da una gran reducción de costos, asimismo, se dejará una línea de investigación para generaciones futuras.	<ul style="list-style-type: none"> • Gestión de la administración del campus • Usuarios del campus universitario • El contratista 	Reducir los retrabajos generando una mayor precisión y, como consecuencia, una reducción de costos. Además, dejar una línea de investigación para futuras investigaciones.
Social	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.b Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.	Si la hipótesis es comprobada, generará mayor diversificación de pequeñas empresas que se dediquen a la fotogrametría en obra, lo cual generará mayor empleo.	<ul style="list-style-type: none"> • La industria de la construcción peruana • Usuarios del campus universitario • La población 	Se promoverá la innovación en las industrias, diversificando el mercado y beneficiando a la sociedad del país.
Ambiental	Objetivo Desarrollo Sostenible 9: Industria, innovación e infraestructura	9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.	El uso de fotogrametría a diferencia del modelo As-Built disminuye retrabajos, por lo tanto, disminuye el impacto ambiental. Eso se dará si se comprueba que esta metodología es más precisa que la otra.	<ul style="list-style-type: none"> • El campus universitario • El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneariamiento del Perú • La industria de la construcción peruana • La población 	Al reducir la cantidad de retrabajos se disminuye el impacto al medio ambiente

Nota. Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Si bien al momento de realizar el procesamiento fotogramétrico no se añade la posición desde donde fueron tomadas cada una de las fotografías, ambos softwares profesionales son capaces de estimarla mediante la aerotriangulación, lo cual es beneficioso, ya que en muchos casos no se cuenta con dicha información.
- Tanto como para el procesamiento fotogramétrico en Pix4D y ContextCapture se añadieron check points, los cuales se usan para evaluar la precisión del proyecto, en el periodo del mes de julio con el objetivo de mejorar la calidad de las imágenes y precisión, sin embargo, no hubo una notoria diferencia en comparación con los periodos donde no se tomaron en cuenta.
- Respecto a los métodos de fotogrametría, según los reportes obtenidos de cada software, el procesamiento por ContextCapture posee la menor desviación estándar, es decir, tiene una menor dispersión de los datos en comparación con Pix4D. En otras palabras, este último software posee una mayor probabilidad de error durante el procesamiento que ContextCapture.
- Comparando los dos softwares de fotogrametría, ContextCapture de Bentley tuvo un ahorro de tiempo de alrededor de 20 minutos en comparación con el software Pix4D para vuelos a 100 metros de altura. Así mismo, ContextCapture también tuvo un ahorro de tiempo de 5 horas 41 minutos 22 segundos en comparación con el software Pix4D para vuelos a 50 metros de altura.
- Para vuelos a 100 metros de altura, según los “Quality Reports”, se concluye que el software ContextCapture de Bentley es más preciso que Pix4D, ya que este último tiene una precisión de ± 1.66 cm, mientras que ContextCapture tiene una precisión ± 0.95 cm. Estas precisiones se lograron bajo las siguientes condiciones: tamaño de píxel de la cámara de 2.34 cm (promedio), ángulo de la cámara de 90° respecto a la posición del terreno, un factor de luminosidad promedio de 48,687.88 luxes, velocidad del viento de 2.11 m/s y una temperatura promedio de 19.64°C . Dentro de las especificaciones técnicas de la computadora donde se realizaron los procesamientos se tuvieron: Windows 10 Enterprise (64-bit), CPU (Intel® Core™ i7-8700 CPU @3.20 GHz), RAM (64 GB), GPU (NVIDIA GeForce RTX 2080,

Intel® UHD Graphics 630, Citrix Display Only Adapter, Citrix Indirect Display Adapter.

- Según los resultados obtenidos a 100 m de altura de vuelo se determina que ambos softwares cuentan con la precisión necesaria para una supervisión de obra de una edificación, puesto que la precisión absoluta se encuentra dentro del rango de 1 a 3 veces el valor de su GSD (2.34 cm/px).
- Para vuelos a 50 metros de altura, según los “Quality Reports”, también se concluye que el software ContextCapture de Bentley es más preciso que Pix4D, ya que este último tiene una precisión de ± 3.67 cm, mientras que ContextCapture tiene una precisión ± 1.08 cm. Estas precisiones se lograron bajo las siguientes condiciones: 100 metros de altura de vuelo, tamaño de píxel de la cámara de 2.46 cm (promedio), ángulo de la cámara de 90° respecto a la posición del terreno, un factor de luminosidad promedio de 13,650 luxes, velocidad del viento de 2 m/s y una temperatura promedio de 17°C . Dentro de las especificaciones técnicas de la computadora donde se realizaron los procesamientos se tuvieron: Windows 10 Enterprise (64-bit), CPU (Intel® Core™ i7-8700 CPU @3.20 GHz), RAM (64 GB), GPU (NVIDIA GeForce RTX 2080, Intel® UHD Graphics 630, Citrix Display Only Adapter, Citrix Indirect Display Adapter).
- Según los resultados obtenidos a 50 m de altura de vuelo se determina que ambos softwares cuentan con la precisión necesaria para una supervisión de obra de una edificación, puesto que la precisión absoluta se encuentra dentro del rango de 1 a 3 veces el valor de su GSD (2.46 cm/px). Según los “Quality Reports” bien el software ContextCapture tiene mayor precisión que Pix4D y requiere de un menor tiempo de procesamiento, este necesita una mayor participación durante este proceso por parte del usuario, ya que es necesario realizar varias aerotriangulaciones para obtener resultados más exactos.
- Según los datos obtenidos de las creaciones 3D de las nubes de puntos de cada software en comparación con el Modelo As-Built, se concluye que Pix4D tiene una mayor precisión que ContextCapture, ya que el resultado del primero fue de ± 22.5 cm; mientras que el del segundo, ± 23.1 cm.
- Según la comparación realizada entre las creaciones 3D de las nubes de puntos y el Modelo As-Built, se determina que las precisiones no son aceptables para una

supervisión de obra, ya que la precisión absoluta no se encuentra dentro del rango de 1 a 3 veces su GCD (2.46 cm/px).

- Existe una divergencia entre los resultados obtenidos de los reportes de cada software en comparación con los obtenidos de las creaciones 3D de las nubes de puntos, debido a que en esta última se extrajeron las coordenadas de cada punto manualmente, con lo cual se pudo haber aumentado el porcentaje de error humano y con esto afectar los resultados finales.
- Se concluye el realizar la supervisión de obra mediante fotogrametría, tomando en cuenta el software ContextCapture por ser el más eficiente, genera una reducción de tiempo del 49.01% con una precisión de ± 0.01 metros, siendo esta última un margen de error muy pequeño. Como consecuencia, el supervisor obtiene datos confiables de la obra en menor tiempo, permitiéndole llevar un mejor seguimiento y control, reduciendo o evitando problemas que se puedan presentar en esta misma, tales como problemas estructurales y de servicio en la construcción. Así mismo, de requerirlo el proyecto, se podría aumentar la frecuencia con la que se realizan los levantamientos fotogramétricos, generando una supervisión más exhaustiva, precisa y constante sin ocasionar retrasos.
- Finalmente, se busca fomentar el uso de nuevos métodos para la supervisión de obra, ya que, como se demuestra en esta tesis, mediante la fotogrametría se logra como resultado mayor eficiencia y fiabilidad en comparación con el modelo As-Built, lo que genera menores tiempos de entrega y reducción costos. Aportando así al objetivo de desarrollo sostenible (ODS 9) de la industria, innovación e infraestructura.

RECOMENDACIONES

- Tener en cuenta las condiciones climatológicas como la humedad y la luminosidad del momento en el que se realizarán los vuelos porque esto genera una mayor distorsión y reduce la calidad de las imágenes tomadas por los drones.
- Verificar los requerimientos técnicos del computador donde se realizarán los procesamientos en los softwares profesionales de fotogrametría, tales como el procesador, la memoria RAM, la tarjeta gráfica, entre otros, debido a que esto es de suma importancia para evitar interrupciones que perjudicarían la calidad y precisión del procesamiento o, en el peor caso, generaría errores que impedirían realizarlo.
- Investigar previamente sobre los softwares a utilizar y sus características principales, haciendo énfasis en las funciones que se emplearán según sean las necesidades del proyecto.
- Marca visiblemente los puntos de control (GCP's) en la obra y realizarles un mantenimiento constante para que al momento de ejecutar los vuelos se distingan bien en las fotografías, ya que el usuario registra manualmente los GCP's en cada imagen, lo que conllevaría a reducir el error humano y, en el caso del software ContextCapture, producir un menor número de procesamientos de aerotriangulación.
- Buscar nuevos softwares de fotogrametría profesionales con funciones innovadoras o similares a los usados en esta tesis con el objetivo de ampliar las métricas y mejorar los resultados obtenidos.
- Mantenerse actualizado e investigar sobre los avances en la tecnología de drones u otras herramientas similares para realizar la recolección de datos con sistemas y cámaras con la mejor resolución posible del momento en que se realice la investigación y corroborar la mejora de la precisión al momento del procesamiento.
- Profundizar en el uso y beneficios de los check points en la búsqueda de mejorar la precisión y calidad del procesamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta, G., McClung, E., Jiménez, G., & García, V. H. (2018). El empleo de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron) como herramienta de evaluación del patrimonio en riesgo: chinampas arqueológicas de Xochimilco. *Revista Española de Antropología Americana*, 47. <https://doi.org/10.5209/REAA.61978>
- Albeaino, G., Gheisari, M., & Franz, B. (2019). A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain [Una revisión sistemática de las áreas y tecnologías de aplicación de vehículos aéreos no tripulados en el dominio AEC]. *Journal of Information Technology in Construction*. <https://www.itcon.org/2019/20>
- Alwateer, M., Loke, S., & Fernando, N. (2019). Enabling Drone Services: Drone Crowdsourcing and Drone Scripting [Habilitación de servicios de drones: crowdsourcing de drones y scripting de drones]. *IEEE Access*, 7, pp. 110035-110049. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933234>
- Anwar, N., Izhar, M., & Najam, F. (2018). Construction Monitoring and Reporting using Drones and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [Monitoreo e informes de construcción utilizando drones y vehículos aéreos no tripulados (UAV)]. *Conference: The Tenth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-10)*. <https://www.researchgate.net/publication/326264559>
- Arias, J., Parra, L., & Picón, M. (2023). *Metodología para el seguimiento, control y supervisión mediante el uso de dron para la construcción de la placa huella en concreto de la vía terciaria Las Minas - La Laguna en el tramo comprendido entre el K0+000 al K0+123 del Municipio de Mutiscua, Norte de Santander*. Universidad Santo Tomás, Colombia. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/50666>

- Bentley (2021). *Bentley ContextCapture*. <https://www.bentley.com/es/products/brands/contextcapture>
- Chen, M., Feng, A., McCullough, K., Prasad, P. B., McAlinden, R., & Soibelman, L. (2020). 3D Photogrammetry Point Cloud Segmentation Using a Model Ensembling Framework [Segmentación de nubes de puntos de fotogrametría 3D utilizando un marco de ensamblaje de modelos]. *Advances in Civil Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000929
- Chong, Y., Lee, Y., & Wang, X. (2017). A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability [Una revisión mixta de la adopción del Modelado de Información de Construcción (BIM) para la sostenibilidad]. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 4114-4126. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006041942&doi=10.1016%2fj.jclepro.2016.09.222&partnerID=40&md5=47bd9f5b059914a72225a6eb9b7f9a5e>
- Ciampa, E., De Vito, L., & Pecce, M. R. (2019). Practical issues on the use of drones for construction inspections [Cuestiones prácticas sobre el uso de drones para inspecciones de construcción]. *Journal of Physics: Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/1249/1/012016
- De Oca, M. (1989). *Topografía* (4.^a ed. rev.). Alfaomega. <https://www.librosarq.com/manual/topografia-miguel-montes-de-oca/#.YU0K2y9w1pR>
- Diazgranados, M. (2018). *Cambiando el chip en la construcción, dejando la metodología tradicional de diseño CAD para aventurarse a lo moderno de la metodología BIM*. Universidad Católica de Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16606/1/2018.05.22%20Proyecto%20de%20grado%20BIM%20-%20MIGUEL%20BLANCO%20DIAZGRANADOS.pdf>
- DJI (2021). *Enterprise*. <https://www.dji.com/products/enterprise?site=brandsite&from=nav#drones>

- Doran, H. D., Reif, M., Oehler, M., Stöhr, C., & Capone, P. (2020). Conceptual design of human-drone communication in collaborative environments [Diseño conceptual de la comunicación humano-drone en entornos colaborativos]. *International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops*. DOI: 10.1109/DSN-W50199.2020.00030
- Gao, Q., Shen, X., & Niu, W. (2020). Large-scale synthetic urban dataset for aerial scene understanding [Conjunto de datos urbanos sintéticos a gran escala para la comprensión de escenas aéreas]. *IEEE Access*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8037440/>
- González, C. (2015). *Building Information: Metodología, aplicaciones y ventajas. Casos prácticos en gestión de proyectos*. Universidad Politécnica de Valencia, España. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/56357/TFM%202015%20CARLOS%20GONZALEZ.pdf?sequence=1>
- Guo, N., & Li, Y. (2019). The Accuracy of Low-Altitude Photogrammetry of Drones [La precisión de la fotogrametría de drones a baja altitud]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218001420590296>
- Ham1, Y., Han, K., Lin, J., & Golparvar-Fard, M. (2016). Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A review of related works [Monitoreo visual de los sistemas de infraestructura civil a través de vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras: una revisión de los trabajos relacionados]. *Visualization in Engineering*. DOI: 10.1186/s40327-015-0029-z
- Hevia, P. (2021). *Automatización de procesos constructivos de material ligero dentro de una obra*. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/180294/Automatizacion-de-procesos-constructivos-de-material-ligero-dentro-de-una-obra.pdf?sequence=1>

- Ibaceta, D. (2018). *Aplicación de modelo de nubes de puntos generados a partir de fotogrametría en proyectos BIM*. Universidad de San Sebastián, Chile. <http://www.inglomayor.cl/v3/50/53.pdf>
- Irizarry, J., Gheisari, M., & Walker, B. (2012). Usability assessment of drone technology as safety inspection tools [Evaluación de la usabilidad de la tecnología de drones como herramientas de inspección de seguridad]. *Journal of Information Technology in Construction*. <https://www.itcon.org/2012/12>
- Ismael, M., Kumar, N., Abidin, M., & Madun, A. (2018). Systemic Approach to Elevation Data Acquisition for Geophysical Survey Alignments in Hilly Terrains Using UAVs [Enfoque sistémico para la adquisición de datos de elevación para alineaciones de levantamientos geofísicos en terrenos montañosos utilizando UAVs]. *Journal of Physics: Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012104
- Jiménez, M., Padilla, C., Estrada, J., González, M., Gómez, H., & Flores, O. (2018). Steganography applied in the origin claim of pictures captured by drones based on chaos [Esteganografía aplicada en la reivindicación de origen de imágenes capturadas por drones basadas en el caos]. *Ingeniería e Investigación*, 38 (2), pp. 61-69. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.64509>
- Kangunde, V., Jamisola, R., & Theophilus, E. (2021). A review on drones controlled in real-time [Una revisión sobre drones controlados en tiempo real]. *International Journal of Dynamics and Control*. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00737-5>
- Kim, D., & Oh, P. (2018). Lab automation drones for mobile manipulation in high throughput systems [Drones de automatización de laboratorio para manipulación móvil en sistemas de alto rendimiento]. *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. <https://www.eventscribe.com/2018/SLAS2018/ajaxcalls/PresentationInfo.asp?efp=UINRSFhCVFE0NjQ0&PresentationID=327445&rnd=0.2572677>
- Li, Y., & Chunlu, L. (2018). Applications of multicopter drone technologies in construction management [Aplicaciones de las tecnologías de drones multicopter

en la gestión de la construcción]. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452101>

Loveless, C. (2018). *Drones in Construction* [Drones en construcción]. University of Mississippi, Estados Unidos. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3111338>

Massimiliano, P., & Constantino, D. (2020). UAV photogrammetry and 3D modelling of complex architecture for maintenance purposes: The case study of the Masonry Bridge on the Sele River, Italy [Fotogrametría UAV y modelado 3D de arquitectura compleja con fines de mantenimiento: el caso de estudio del puente de mampostería en el río Sele, Italia]. *Periódica Polytechnica: Civil Engineering*, 65 (1), pp. 191-203. <https://doi.org/10.3311/PPci.16398>

Mat, M., Abdullah, S., Abdul, S., Mohd, M., & Tahar, K. (2020). Reconstruction of 3D accident scene from multirotor UAV platform [Reconstrucción de la escena del accidente en 3D desde una plataforma UAV multirotor]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-451-2020>

Medina, M., & Ramírez, K. (2019). *Implementación de BIM para la elaboración de un modelo As Built para la gestión del proyecto "Hotel La Consolata"*. Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/11384>

Pan, N.-H., Tsai, C.-H., Chen, K.-Y., & Sung, J. (2020). Enhancement Of External Wall Decoration Material for the Building in Safety Inspection Method [Mejora del material de decoración de paredes externas para el edificio en el método de inspección de seguridad]. *Journal of Civil Engineering and Management*. <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.11925>

Pix4D (2021). *PIX4Dmapper*. <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software>

Rómel, S. (2004). La supervisión de obra. *Ingeniería*, 8 (1), pp. 55-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780106>

Zaychenko, I., Smirnova, A., & Borremans, A. (2018). Digital transformation: The case of the application of drones in construction [Transformación digital: el caso de la aplicación de drones en la construcción]. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819305066>

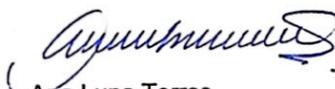




ANEXOS

Anexo 1: Formato del informe del asesor

Anexo 1: Informe del asesor

INFORME DEL ASESOR	
Nombre del Asesor: Ana Luna Torres/ Mónica Vergara Olivera	
Categoría (auxiliar, asociado o principal): Profesor TC auxiliar/ Jefe de Práctica	
Departamento, Universidad, Empresa a la que pertenece: Universidad de Lima	
Título del Plan de Tesis: "Análisis comparativo entre la supervisión de obra de una edificación por fotogrametría y modelo As Built"	
Nombre de los tesistas: Martin Alejandro Depaz Campoverde/ Hans Jhonny Paitanmala Núñez.	
Describe los motivos que avalan la calidad del Tesis, originalidad y metodología:	
El proyecto se ha realizado de acuerdo con los requerimientos y metodología establecidos en los cursos de Seminario de Investigación I y II. El caso de estudio planteado es una obra de la Universidad de Lima con suficiente información para realizar comparaciones que permitan definir variables importantes como la precisión.	
Describe las posibles contribuciones de la investigación:	
El presente Trabajo de investigación fomenta la innovación promoviendo la incorporación de métodos y tecnologías no convencionales para los proyectos de construcción. Se busca eficiencia y fiabilidad durante la supervisión de obras a través de equipos UAV no tripulados.	
¿Considera que la Tesis estará apto para su sustentación?	
A finales de 2021	<input type="checkbox"/>
Entre enero y marzo de 2022	<input checked="" type="checkbox"/>
En otra fecha:	
	
Ana Luna Torres	
Fecha: 4 de diciembre 2021	

Depaz_Paitanmala_Tesis 2.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

EN

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

eprints.uthm.edu.my

Fuente de Internet

2%

2

www.acute3d.com

Fuente de Internet

1%

3

ic-sd.org

Fuente de Internet

1%

4

www.voosestore.com

Fuente de Internet

1%

5

communities.bentley.com

Fuente de Internet

1%

6

Submitted to Danford College

Trabajo del estudiante

1%

7

link.springer.com

Fuente de Internet

<1%

8

www.amazon.co.uk

Fuente de Internet

<1%

9

argos.co

Fuente de Internet

<1%

10

Submitted to Curtin University of Technology

Trabajo del estudiante

<1 %

11

core.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

12

Chong, Heap-Yih, Cen-Ying Lee, and Xiangyu Wang. "A mixed review of the adoption of Building Information Modelling (BIM) for sustainability", Journal of Cleaner Production, 2016.

Publicación

<1 %

13

Cheah Dei Xuan, Heshalini Rajagopal, Shayla Islam, Neesha Jothi, Sook Fern Yeo, Kay Hooi Keoy. "Driving SDG Impact: Web-Based Stocktaking Systems for Sustainable Business Operations", Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 2023

Publicación

<1 %

14

Jorge E. Egger, Fabian R. Rojas, Leonardo M. Massone. "High-Strength Reinforcing Steel Bars: Low Cycle Fatigue Behavior Using RGB Methodology", International Journal of Concrete Structures and Materials, 2021

Publicación

<1 %

15

Submitted to Leeds Beckett University

Trabajo del estudiante

<1 %

16

academicjournals.org

Fuente de Internet

<1 %

17

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

18

Eixenberger, Joseph G.. "Seismic Analysis of and Provisions for Dry-Stack Concrete Masonry Wall Systems with Surface Bond in Low-Rise Buildings.", Brigham Young University, 2020

Publicación

<1 %

19

Submitted to Universidad La Gran Colombia

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado