



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**“Validación de la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV en al menos un puente y un edificio”**

Almeida Cuasapaz, Kevin Gustavo

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

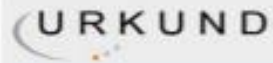
Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

M. Sc. Sinda González, Izar

M. Sc Leiva González, César Alberto

10 de septiembre de 2021



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS\_Almeida.docx (D112251584)  
**Submitted:** 9/8/2021 8:10:00 PM  
**Submitted By:** jc.altamiranoc@uta.edu.ec  
**Significance:** 1 %

Sources included in the report:

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4908/1/PerezLopezSamanda2015.pdf>

Instances where selected sources appear:

1

Firma:



.....  
CESAR SINDE  
GONZALEZ

**Ing. Sinde González, Izar M. Sc**

C. C. 1756491278

Firma:



.....  
CESAR ALBERTO  
LEIVA GONZALEZ

**Ing. Leiva González, César M. Sc**

C. C. 1715416689



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el trabajo de integración curricular, “Validación de la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV en al menos un puente y un edificio” fue realizado por el señor Almeida Cuasapaz Kevin Gustavo el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de septiembre de 2021

Firma:



ISAR SINDE  
GONZALEZ

**Ing. Sinde González, Izar M. Sc**

C. C. 1756491278

Firma:



CESAR ALBERTO  
LEIVA GONZALEZ

**Ing. Leiva González, César M. Sc**

C. C. 1715416689



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Almeida Cuasapaz Kevin Gustavo**, con cédula de ciudadanía n° 1004574180, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Validación de la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV en al menos un puente y un edificio"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 10 de septiembre de 2021**

Firma

**Almeida Cuasapaz Kevin Gustavo**

C.C.: 1004574180



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Almeida Cuasapaz Kevin Gustavo**, con cédula de ciudadanía n° 1004574180, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: "**Validación de la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV en al menos un puente y un edificio**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de septiembre de 2021

Firma

**Almeida Cuasapaz Kevin Gustavo**

C.C.: 1004574180

### **Dedicatoria**

“Quiero dedicar este trabajo a Dios, mi gran amigo, en quien he podido confiar, y mi apoyo incondicional.

A mi madre, Guadalupe Cuasapaz, que me apoyó para que nunca me rindiera, a mi padre, Gustavo Almeida, por recordarme que el esfuerzo y la dedicación son grandes armas frente a las adversidades, a ellos, por el grande amor que les tengo y de los que sé que aún tengo muchas cosas por aprender, a mi hermano, que es una de las personas más importantes en mi vida, mis sotas.

A todos mis seres queridos y amigos que fueron pieza fundamental para el todo sea un poco más sencillo.”

## Agradecimiento

Que esta página represente mi sincero agradecimiento a todas las personas que con su ayuda colaboraron en la realización de este trabajo, y me acompañaron a través de la carrera, extendiéndome su mano y brindándome su consejo.

A mis padres, que con su sacrificio me dieron la oportunidad de ir más allá, por sus historias, consejos y ayuda incondicional, porque sin ustedes no sería quien soy.

A mis tutores M. Sc Sinde, Izar e M. Sc Leiva, César por brindar su tiempo y guía para la elaboración del trabajo hasta su culminación; a mis seres queridos y amigos: Stivi, Alexander, Sani, Sharon, JD, Palul, Mitu, Diana, Robin, Mary, Carlos, Sebas, Ariel y otros amigos, que hicieron que la vida universitaria este llena de anécdotas que el tiempo no borrará.

Finalmente agradecer a aquellos docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE que supieron compartir su conocimiento y fueron parte de la culminación de mi carrera universitaria.

A todos ellos, muchas gracias.

## Tabla de contenido

<b>Urkund .....</b>	<b>2</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilida de Autoría .....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de Publicación .....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla de contenido .....</b>	<b>8</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>17</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>19</b>
<b>Aspectos Generales.....</b>	<b>19</b>
Antecedentes.....	19
Planteamiento del problema .....	21
Justificación e importancia .....	23
Objetivos.....	25
Objetivo General .....	25
Objetivo Específico.....	25
<b>Capítulo II .....</b>	<b>26</b>
<b>Marco Teórico .....</b>	<b>26</b>
Puente .....	26



Generalidades de Puentes .....	26
Edificio .....	26
Concepto.....	26
Definición. ....	26
Topografía terrestre .....	27
Topografía.....	27
Concepto. ....	27
Definición.....	27
Geomática.....	27
Levantamiento Geodésicos y planos .....	27
Levantamiento de construcción .....	28
Equipo especializado para levantamientos de construcción .....	28
Instrumento de rayo láser visible.....	28
MED de láser de pulsación. ....	29
Escáneres de láser. ....	29
Causas de error en levantamientos de construcción .....	29
Sistema global de navegación satelital- GNSS .....	30
Aplicaciones GNSS .....	30
Posicionamiento, navegación y cronometraje. ....	30
Percepción remota GNSS.....	31
Formato RTCM .....	31

	10
GPS Ntrip .....	32
Vehículos aéreos no tripulados y Fotogrametría .....	34
Vehículos aéreos no tripulados .....	34
Navegación .....	35
Fotogrametría SfM .....	36
Modelo Digital de Elevaciones (MDE) .....	36
Modelo Digital de Superficie (MDS).....	37
Modelo Digital de Terreno (MDT) .....	37
Escala de trabajo y Ground Sample Distance (GSD).....	37
El sensor, la cámara fotográfica .....	37
La red fotogramétrica .....	38
El sistema de orientación y escalado de las escenas .....	39
Variables y configuraciones del SfM.....	39
Tipo de misiones fotogramétricas .....	40
Indicadores de calidad geométrica.....	42
Precisión de posicionamiento geoespacial.....	43
Indicadores de calidad visual.....	44
Indicadores de rendimiento y accesibilidad .....	44
Especificaciones del Equipo Topográfico .....	45
Mavic Pro.....	45
Receptora GPS R8s .....	47

	11
Estación total M3 .....	48
Base Legal.....	49
<b>Capítulo III .....</b>	<b>51</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>51</b>
.....	<b>52</b>
Descripción de las áreas de estudio .....	52
Consideraciones y Equipo Topográfico.....	55
Consideraciones Previas.....	55
Características del Equipo Topográfico .....	56
Trabajos de campo.....	57
Reconocimiento de la zona.....	58
Ubicación y posicionamiento de puntos de control.....	58
Fotogrametría .....	61
Procesamiento en software Pix4dmapper .....	62
Reporte estadístico .....	67
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>71</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>71</b>
Delimitación del área de estudio .....	71
Fotogrametría .....	73
Procesamiento en software Pix4dmapper .....	78
Puente Alfredo Gangotena .....	78

	12
Vuelo circular a 35 m de altura.....	78
Vuelo circular a 40 m de altura.....	81
Vuelo doble malla 40 m de altura.....	83
Centro de Investigaciones ESPE.....	85
Vuelo circular a 37 m de altura.....	85
Vuelo circular a 45 m de altura.....	87
Vuelo doble malla a 45 m de altura.....	89
Reporte estadístico .....	95
Puente Alfredo Gangotena .....	95
Centro de Investigaciones ESPE.....	102
<b>Capítulo V .....</b>	<b>122</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>122</b>
Conclusiones .....	122
Recomendaciones .....	124
<b>Referencias .....</b>	<b>125</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Especificaciones Mavic Pro</i> .....	46
<b>Tabla 2</b> <i>Especificaciones Sistema Trimble R8 GNSS</i> .....	47
<b>Tabla 3</b> <i>Especificaciones Estación total M3</i> .....	49
<b>Tabla 4</b> <i>Datos de fotogrametría realizada con UAV Mavic Pro</i> .....	61
<b>Tabla 5</b> <i>Valores de k según el intervalo de confianza</i> .....	70
<b>Tabla 6</b> <i>Imágenes aéreas obtenidas mediante fotogrametría.</i> .....	73
<b>Tabla 7</b> <i>Coordenadas UTM de puntos del puente</i> .....	74
<b>Tabla 8</b> <i>Coordenadas UTM de puntos edificio</i> .....	74
<b>Tabla 9</b> <i>Coordenadas UTM de fachada frontal del edificio</i> .....	75
<b>Tabla 10</b> <i>Coordenadas UTM de la fachada lateral del edificio, sector garita</i> .....	76
<b>Tabla 11</b> <i>Coordenadas UTM de la fachada posterior del edificio, sector- terrenos ESPE</i> .....	77
<b>Tabla 12:</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, para vuelo circular a 35 m de altura</i> .....	96
<b>Tabla 13:</b> <i>Tabla de resultados del vuelo circular en el puente a 35 m de altura.</i> .....	97
<b>Tabla 14</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, para vuelo circular a 40 m de altura</i> .....	98
<b>Tabla 15</b> <i>Tabla de resultados del vuelo circular en el puente a 40 m de altura.</i> .....	99
<b>Tabla 16</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, vuelo doble malla a 40 m de altura</i> .....	100
<b>Tabla 17</b> <i>Tabla de resultados de la fotogrametría en el puente, vuelo doble malla a 40 m de altura</i> .....	101
<b>Tabla 18</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el edificio, para vuelo circular a 37 m de altura</i> .....	103
<b>Tabla 19</b> <i>Tabla de resultados de la fotogrametría en el edificio a 37 m de altura</i> .....	104

<b>Tabla 20</b> .....	105
<b>Tabla 21</b> .....	106
<b>Tabla 22</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el edificio, para vuelo doble malla a 45 m de altura.</i> .....	107
<b>Tabla 23</b> <i>Tabla de resultados de la fotogrametría en el edificio a 45 m de altura.</i> .....	108
<b>Tabla 24</b> <i>Resultados de errores estadísticos del puente Alfredo Gangotena.</i> .....	109
<b>Tabla 25</b> <i>Resultados de errores estadísticos del edificio de Investigaciones.</i> .....	111
<b>Tabla 26</b> <i>Cálculo estadístico de puntos georreferenciados con estación total en el edificio.</i> ..	115
<b>Tabla 27</b> <i>Tabla de resultados de puntos de estación total en fotogrametría del edificio a 37 m de altura.</i> .....	119
<b>Tabla 28</b> <i>Cálculo de precisiones de modelo 3D del puente Alfredo Gangotena.</i> .....	121
<b>Tabla 29</b> <i>Cálculo de precisiones de modelo 3D edificio de investigaciones ESPE.</i> .....	121

## Índice de Gráficos

<b>Figura 1</b>	<i>Arquitectura del NTRIP.....</i>	<b>33</b>
<b>Figura 2</b>	<i>Estación ESPE, código y estado para el servicio NTRIP, Ecuador.....</i>	<b>34</b>
<b>Figura 3</b>	<i>Diseño de alto nivel para comunicación con drones.....</i>	<b>35</b>
<b>Figura 4</b>	<i>Tipos de misiones con dron.....</i>	<b>41</b>
<b>Figura 5</b>	<i>Diagrama de metodología para la validación de modelo digital.....</i>	<b>51</b>
<b>Figura 6</b>	<i>Zona ubicación del puente Alfredo Gangotena.....</i>	<b>53</b>
<b>Figura 7</b>	<i>Imagen satelital del nuevo Centro de Investigaciones -ESPE.....</i>	<b>54</b>
<b>Figura 8</b>	<i>Mapa de ubicación del puente que conecta la calle Alfredo Gangotena.....</i>	<b>55</b>
<b>Figura 9</b>	<i>Dron Plegable Mavic Pro.....</i>	<b>56</b>
<b>Figura 10</b>	<i>Receptora GPS Trimble R8s.....</i>	<b>57</b>
<b>Figura 11</b>	<i>Clavo topográfico 3/8 x 3”.....</i>	<b>59</b>
<b>Figura 12</b>	<i>Paineles colocados en la terraza del edificio de investigaciones.....</i>	<b>59</b>
<b>Figura 13</b>	<i>Paineles colocados sobre los puntos de control, zona del puente.....</i>	<b>60</b>
<b>Figura 14</b>	<i>Configuración en campo de la colectora Trimble.....</i>	<b>60</b>
<b>Figura 15</b>	<i>Dron Mavic Pro, en la zona del edificio.....</i>	<b>62</b>
<b>Figura 16</b>	<i>Procesamiento inicial en el software Pix4dmapper.....</i>	<b>64</b>
<b>Figura 17</b>	<i>Procesamiento de la nube puntos y malla en el software Pix4dmapper.....</i>	<b>65</b>
<b>Figura 18</b>	<i>Procesamiento MDS, Ortomosaico e Índices en el software Pix4dmapper.....</i>	<b>65</b>
<b>Figura 19</b>	<i>Informe de calidad de procesamiento.....</i>	<b>66</b>
<b>Figura 20</b>	<i>Mapa de delimitación de zona del puente sobre avenida Alfredo Gangotena.....</i>	<b>71</b>
<b>Figura 21</b>	<i>Mapa de delimitación de zona del edificio de investigaciones ESPE.....</i>	<b>72</b>
<b>Figura 22</b>	<i>Informe de calidad de vuelo circular 35 m de altura.....</i>	<b>79</b>
<b>Figura 23</b>	<i>Archivo exportable formato LAS.....</i>	<b>80</b>
<b>Figura 24</b>	<i>Archivo 3D, producto de la nube de puntos y malla de triángulos.....</i>	<b>80</b>

<b>Figura 25</b>	<i>Informe de calidad de vuelo circular a 40 metros de altura.....</i>	82
<b>Figura 26</b>	<i>Informe de calidad de vuelo doble malla a 40 m de altura.....</i>	84
<b>Figura 27</b>	<i>Archivo 3D, producto de la nube de puntos y malla de triángulos del vuelo doble malla.....</i>	85
<b>Figura 28</b>	<i>Informe de calidad de vuelo circular a 37 m de altura.....</i>	86
<b>Figura 29</b>	<i>Archivo 3D del vuelo circular a 37 m del edificio.....</i>	87
<b>Figura 30</b>	<i>Informe de calidad de vuelo circular a 45 m de altura.....</i>	88
<b>Figura 31</b>	<i>Archivo 3D del vuelo circular a 45 m del edificio.....</i>	89
<b>Figura 32</b>	<i>Informe de calidad de vuelo doble malla a 45 m de altura.....</i>	90
<b>Figura 33</b>	<i>Archivo 3D del vuelo doble malla del edificio de investigaciones.....</i>	91
<b>Figura 34</b>	<i>Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo doble malla en el puente.....</i>	91
<b>Figura 35</b>	<i>Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo circular en el puente.....</i>	92
<b>Figura 36</b>	<i>Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo doble malla en el edificio.....</i>	93
<b>Figura 37</b>	<i>Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo circular en el edificio.....</i>	93
<b>Figura 38</b>	<i>Ubicación de puntos de control y verificación en la zona puente.....</i>	95
<b>Figura 39</b>	<i>Ubicación de puntos de control y verificación en la zona edificio para restitución fotogramétrica.....</i>	102
<b>Figura 40</b>	<i>Errores estadísticos del modelo digital del terreno en elevación del puente.....</i>	110
<b>Figura 41</b>	<i>Errores estadísticos modelo digital del terreno en elevación del edificio.....</i>	112
<b>Figura 42</b>	<i>Ubicación de puntos de control y verificación frente del edificio.....</i>	113
<b>Figura 43</b>	<i>Ubicación de puntos de control y verificación del edificio, sector garita.....</i>	114
<b>Figura 44</b>	<i>Ubicación puntos de control y verificación del edificio, sector posterior.....</i>	114
<b>Figura 45</b>	<i>Histograma de diferencias de puntos comparados.....</i>	120



## Resumen

El presente trabajo de investigación propone la validación de la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV (vehículo no tripulado) en el puente que conecta la calle Alfredo Gangotena, ubicado en la parroquia de Conocoto del Distrito Metropolitano de Quito y el edificio del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y Post Grado de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Para alcanzar el objetivo, se realizarán capturas de fotografías aéreas del edificio y puente en mención, utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y se generará un modelo digital mediante tecnología Sfm que represente modelos 3D, los cuales serán georreferenciados y validados con puntos de control y verificación obtenidos con la base receptora GPS Trimble R8s en el servicio Ntrip, obteniendo un control geométrico de las zonas de investigación. De modo que, persigue una metodología dirigida al análisis de variables como: Fotogrametría con Vehículos no Tripulados, puntos de control geométrico, modelos digitales 3D; enmarcado en la línea de conocimiento Geoespacial.

Finalmente, para la validación de los modelos digitales realizados con UAV se realizará un análisis estadístico que evidencia la calidad de la metodología propuesta y el uso de los modelos para fiscalización de obras civiles, determinando si dichas mediciones se encuentran dentro de las precisiones requeridas. Con lo anteriormente expuesto, se pretende validar los modelos digitales de obras civiles con mediciones realizadas campo y el uso de Sft (Structure from Motion) precedido por el UAV, y que este insumo sirva para la fiscalización de obras civiles.

- Palabras Clave:
- **MODELOS DIGITALES 3D**
- **PRECISIÓN HORIZONTAL**
- **PRECISIÓN VERTICAL**
- **FOTOGRAMETRÍA**

## **Abstract**

The following research proposes the validation of the altimetric precision of digital models generated through UAV (unmanned aerial vehicle) over the area of the bridge connecting Alfredo Gangotena street, located in the parish of Conocoto of the Metropolitan District of Quito and the building of the new Center for Scientific Research and Postgraduate Studies of the University of the Armed Forces-ESPE. To achieve the objective, aerial photographs of the mentioned building and bridge will be captured, using an unmanned aerial vehicle (UAV) to generate a digital model implementing SFT (Structure from motion) technology representing the data through 3D models, which will be georeferenced and validated with points of control and verification obtained with the Trimble R8s GPS receiver base in the Ntrip service, obtaining a geometric control of the research areas. Therefore, defining a methodology aimed towards the analysis of variables such as: Photogrammetry with Unmanned Vehicles, geometric control points, 3D digital models; framed in the line of Geospatial knowledge.

Finally, to validate the digital models made with UAVs, a statistical analysis will be performed to evidence the quality of the proposed methodology and the use of the models for civil works inspection, determining if the observations are within the required precision. On the basis of the foregoing, it is intended to validate the digital models of civil works measurements on site and the use of SFT (Structure from motion) preceded by the UAV, making this input a useful tool for civil works inspections.

- Keywords:
- **3D DIGITAL MODELS**
- **HORIZONTAL PRECISION**
- **VERTICAL PRECISION**
- **PHOTOGRAMMETRY**

## Capítulo 1

### Aspectos Generales

#### Antecedentes

La creación de modelos que representen la superficie terrestre ha acompañado a la humanidad desde tiempos muy antiguos (1400 a.C. aproximadamente), en Egipto se empleó la topografía como método para delimitar linderos de terrenos que anualmente cambiaban de límites a causa del río Nilo, y por los cuales había que pagar impuestos. Luego, Herón alrededor del 120 a.C. creó *La Dioptra*, método utilizado para medir, dibujar y calcular un terreno. De esta forma, los métodos de medición y posicionamiento fueron evolucionando pasando por el uso de *plomadas* (nivelación), el *corobates* (regla horizontal), *quadrans* (bastidor con ángulo de 90° y otras escalas), puntero móvil, astrolabio, el báculo de cruz, etc. (Wolf, 2016).

Todas estas invenciones en busca de un mismo fin, el poder determinar el tamaño y la forma de la Tierra de manera precisa. Evolucionando la metodología de la medición a través de los siglos en la delimitación de fronteras y su materialización en planos. La representación de la superficie terrestre llegó a obtener un alto valor debido al precio que tenía la tierra y sus correctos linderos, que además era innovativo para la época en la construcción de: canales, ferrocarriles y autopistas, convertía a la topografía en sinónimo de desarrollo, progreso, uso y conservación de los recursos de la Tierra (Wolf, 2016).

El siguiente paso en la evolución de mediciones, la era de la *geodesia* (año 1967), se considera la curvatura de la tierra en el estudio de la superficie terrestre, se integra la aplicación de métodos como la triangulación y mínimos cuadrados para reducir los errores. Despejando así el camino hacia los sistemas de información geográfica, catastro, ingeniería, navegación aérea, marítima y terrestre, entre otras. Para luego, definir el uso de tecnología y comunicación

satelital en trabajos de topografía, y llegar a ser mejorada por D'Alembert, con la consideración del achatamiento terrestre y la variación de la densidad de la Tierra (Villalba, 2016).

La geodesia se fue actualizando hasta que en el siglo XX llegó abarcar proyectos de dimensión global, e impulsarse con el uso de computadoras, innovando en el ajuste de redes de triangulación y de satélites artificiales de medición, al punto de obtener distancias entre varios puntos vía GPS (Villalba, 2016).

El desarrollo de equipos de topografía y mapeo, dio lugar a instrumentos de alta tecnología que registran mediciones de manera automática, y Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), alcanzando el uso cámaras aéreas e instrumentos que suministren imágenes digitales para el procesamiento espacial y mapeo mediante fotogrametría digital. Estos sistemas de mapeo móvil 3D capturan puntos de datos y los convierten en coordenadas georreferenciadas de alta calidad, que, de forma similar al levantamiento con puntero, regla, cinta, estación total, que en su época fue cuestionada respecto a su precisión, han contribuido de manera impresionante a las sociedades con un papel importante en la historia frente a sus diversas aplicaciones, y una muy importante, el uso de los sistemas para la creación de estrategias militares. (Wolf, 2016)

Los primeros datos registrados de UAV (vehículos aéreos no tripulados) fue en 1849, por el ejército austriaco en batallas con globos llenos explosivos utilizados en la primera guerra mundial, donde se usó el vehículo Aerial Target y su control de radiofrecuencia AM baja, evolucionando en naves con el mismo fin, desde Hewitt- Serry Automatic Airplane hasta el Kettering Bug. Tras la primera guerra mundial, tres Standard E-1 se convirtieron en drones y llevaron a cabo algunos aviones pilotados mediante radiocontrol, luego, durante la segunda guerra mundial a cargo de la Alemania nazi se desarrolló un UAV que pueda ser utilizado en combate, razón por la cual los programas de investigación americano centró su atención en la inversión de proyectos con vehículos aéreos no tripulados, revolucionando los sistemas hasta

que en 1994 el modelo MQ1 PREDATOR era capaz de realizar posicionamiento GPS, con una diferencia fundamental de sus antecesores, el no estar pre programado ni usar una línea de visión, revolucionando su fiabilidad (Ruipérez, 2015).

En los últimos años estudios como el de (Sapirstein, 2016) han tratado de comprobar la precisión de los modelos medidos a partir de fotogrametría, un tema difícil de abordar, que reconoce muchos errores cometidos causados por mediciones puntuales realizadas con estación total más que la fotogrametría; su estudio trazo una red de objetivos y un conjunto de fotografías para la construcción de modelos 3D, con resultados de precisión precarios, pero con un paso fundamental hacia la mejora de prácticas de modelaje en 3D de alta calidad.

Así también, destaca un estudio realizado por (Green et al., 2014), el cual aborda la toma de nubes de puntos 3D a partir de fotografías, describiendo la estructura de movimiento para la creación de modelos digitales de elevación, validando que la estructura puede producir mejores resultados que las técnicas tradicionales de levantamientos topográficos y fotogrametría, y a la vez ser más barata y accesible, pero con una precisión precaria.

Finalmente el artículo de (Carrera-Hernández et al., 2020), comparo dos enfoques de áreas edificadas heterogéneas, en una extensión de 33 hectáreas y una elevación entre 1899 y 1944 m.s.n.m. Obteniendo resultados positivos sobre las ideas tradicionales de los modelos digitales elaborados a partir de cámaras montadas en vehículos no tripulados (UAV); el método tradicional duro 1 semana, mientras que la metodología UAV-Sfm 4 horas de trabajo.

### **Planteamiento del problema**

La fotogrametría, el uso de nuevas tecnologías como UAV (vehículo no tripulado) y la obtención de modelos digitales, ha revolucionado la topografía, a través de métodos de bajo costo que permite documentar, estudiar y reconstruir modelos en 3D de alta resolución, basado en un conjunto de puntos a partir de redes de objetivos, con resultados realistas a comparación

de métodos tradicionales, como: estación total y GPS, los cuales representan una gran cantidad de recursos y tiempo; por lo que tiene mucho sentido validar los resultados en campo de la metodología con UAV.

De acuerdo con (Sapirstein, 2016) la validación de la precisión de modelos digitales de elevación mediante imágenes capturadas con una cámara montada sobre un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y su procesamiento en el software Sft (Structure from Motion), es complicada debido a la propiedad privada de valores y códigos analíticos.

Como se indica en (Green et al., 2014), debemos evaluar la exactitud de los modelos fotogramétricos, y mientras su precisión cause desconfianza, nunca se tomará en serio como metodología y se considerará como una herramienta de medición. Se debe mostrar los beneficios en velocidad y simplicidad de adquisición a las personas, al ser una herramienta futurista de mayor resolución que puede ser obtenida a un bajo costo.

Para (Jiménez-Jiménez et al., 2017), su trabajo estima la precisión de los modelos digitales de terreno que fueron generados con vehículos aéreos no tripulados usando geolocalización, mediante 11 puntos de control y 12 de verificación que fueron obtenidos con GPS-RTK, se generó un modelo digital del terreno utilizo un proceso de restitución fotogramétrica (vectorización de información captada mediante la Digitalización sobre la ortofoto) con puntos de control terrestre (PCT): 4,5,6,8,9,10 y 11 puntos, utilizando parámetros estadísticos para evaluar la precisión, obteniendo que con cuatro puntos se obtiene con una raíz del cuadro medio del error (RCME)  $> 3$  m y sus tres últimos puntos ( 9, 10 y 11) un  $RCME < 7$  cm; el modelo digital del terreno con 11 puntos de control presentó la mejor precisión topográfica, con una RCME de 5.9 cm, es decir un error tres veces menor que la resolución espacial del orto mosaico y concluye que es necesario al menos cinco puntos de control por cada 15 ha de superficie a levantarse, además de la validación para modelos digitales

mediante fotogrametría generada a través de UAVs con precisiones menores a 10 cm en los tres ejes y afirma su correcta utilización dentro del campo topográfico.

En Ecuador, el estudio desarrollado por (Sani & Tierra, 2015), presentó un trabajo de validación de los productos fotogramétricos obtenidos a partir de tecnología UAV, generando mosaicos orto rectificadas obtenidos de las fotografías aéreas, y obtuvo imágenes ajustadas SIRGAS capaces de generar cartografía de gran escala, y en el proceso de validación se obtuvo una precisión media horizontal de 0,665 m y una diferencia en la geometría de objetos promedio de 0,005 m. Además, obtuvo un modelo digital de la superficie de resolución espacial 0,20 m y validado con el perfil de nivelación.

Ante lo mencionado, la investigación se enfocará en la comparación de puntos coordenados obtenidos de la toma de puntos de control con GPS Trimble R8s en el servicio Ntrip, el control geométrico y las mediciones individuales realizadas con Sft (Structure from Motion) de los modelos digitales a través de UAV, que sirvan como insumo para la fiscalización de Obras Civiles, ayudando al cumplimiento de obras, más estipulaciones realizadas por el Diseñador, en los sectores de estudio: el Centro de Investigaciones Científicas y Post Grado de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el puente ubicado en la calle Alfredo Gangotena.

### **Justificación e importancia**

La fotogrametría de rango cercano, permite obtener datos de objetos o elementos mediante fotografías de los mismos, con mediciones que actualmente generan dudas en la exactitud de los modelos generados. En la literatura son escasos los trabajos que se preocupan de una validación de la metodología en estructuras y obras civiles, muchos enfoques han investigado y documentado geométricamente patrimonios culturales, arquitectónicos, pero muy

pocas investigaciones han sido orientadas a la comprobación y el uso en el campo de la ingeniería civil en el análisis de edificaciones, uso de la técnica como insumo para fiscalizaciones, al igual que los grandes beneficios que brinda la tecnología al disponer de modelos 3D con una métrica de alta precisión que documenta, analiza formas, dimensiones y texturas a resoluciones muy altas, representando un insumo de gran valor, motivo por el que el punto de partida a la aplicación generalizada de estos modelos será el corroborar su confiabilidad en el medio.

A esto se suma, la gran innovación tecnológica que muestran los modelos 3D realizados a partir de fotogrametría SfM, y su menor inversión a comparación de otro tipo de tecnologías como el escáner 3D o dispositivos topográficos, y que es aplicable a geometrías complejas en un tiempo reducido. Por estos motivos, nace la necesidad de realizar el presente estudio.



## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Validar la precisión altimétrica de modelos digitales generados a través de UAV mediante técnicas topográficas convencionales y no convencionales en al menos un puente y en edificio para evidenciar la factibilidad del uso en la fiscalización de obras civiles.

### ***Objetivo Específico***

- Realizar una investigación bibliográfica sobre la generación de modelos 3D de estructura civil con UAV.
- Realizar fotografías aéreas con UAV de una estructura de un puente y un edificio mediante UAV.
- Realizar mediciones de puntos de control encima y fuera de una edificación y un puente para el control geométrico.
- Procesar información obtenida en campo para obtener modelos 3D georreferenciados.
- Generar un reporte estadístico que evidencia la calidad del UAV como herramienta para generación de modelos métricos 3D de estructura civil, al igual que el tipo de misión más adecuada para la elaboración del mismo.

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### **Puente**

Es una estructura construida para evitar obstáculos físicos evitando el cierre de caminos, o interferir con valles, masas de agua o carreteras debajo. Su propósito el sobreasar obstáculos y cuenta con diseños que varían según su función, tipo de terreno, el anclaje, material de construcción y fondos disponibles (Balasubramanian, 2017).

#### ***Generalidades de Puentes***

Los puentes son una de las infraestructuras aplicadas para librar obstáculos naturales, volviéndolas estructuras básicas e indispensables a través de los tiempos; una característica de desarrollo de un sector, región, país, etc. El primer puente probablemente fue un árbol caído sobre un río, o uno formado de rocas. Lo cual sugirió a los primeros constructores sobre las maneras de superar un obstáculo; y partir de estructuras simples abrir un mundo a la ingeniería estructural a lo largo del tiempo (Pipinato, 2016).

#### **Edificio**

##### ***Concepto.***

Es cualquier construcción hecha por el hombre que se encuentra fija y se utiliza como vivienda humana o que permite la realización de distintas actividades (Delgado, 2013).

##### ***Definición.***

Construcción hecha con materiales sólidos que es empleada en fines determinados, de diferente tamaño y forma, construido a partir del trabajo de diferentes personas que cumplen tareas específicas y tiene la finalidad de alojar personas u objetos (Delgado, 2013).

## **Topografía terrestre**

### ***Topografía***

#### **Concepto.**

Es el conjunto de métodos e instrumentos necesarios para representar el terreno con todos sus detalles naturales o artificiales (López, 1996).

#### **Definición.**

La topografía es la ciencia, arte y tecnología de determinar las posiciones relativas de puntos en la superficie de la Tierra; actualmente se ha denominado también como geomática (topografía) (Wolf, 2016).

### ***Geomática***

Sinónimo de topografía, hace énfasis a los avances tecnológicos con los que cuentan los topógrafos; nuevas herramientas de medición y procesamiento de información que incluyen instrumentos electrónicos que determinan distancias y ángulos de forma automática, así como imágenes aéreas modernas y sistemas de procesamiento para mapeo, acompañado de sistemas computacionales que procesan datos automáticamente a gran velocidad (Wolf, 2016).

### ***Levantamiento Geodésicos y planos***

Los levantamientos topográficos se clasifican en dos: geodésicos y planos.

El levantamiento topográfico geodésico, es aquel que considera la curvatura de la superficie terrestre y realiza sus cálculos considerando un elipsoide, determinando ubicaciones relativas que serán referencia para levantamientos de menor magnitud (Wolf, 2016).

En la actualidad, el posicionamiento por satélite ha ido reemplazando a instrumentos electrónicos, y brindando mayor exactitud, velocidad y economía en los proyectos. Estos

receptores GNSS localizan de manera precisa las diferentes estaciones a partir de las distancias a los satélites y son usados en cambios de la hidrografía, construcción y linderos.

La topografía plana, que considera una superficie horizontal como un objeto plano al momento de realizar sus cálculos, al igual que la región y sus ángulos. Además, de que la gran extensión de la superficie terrestre permite aproximarla a una superficie plana (Wolf, 2016).

### ***Levantamiento de construcción***

Aplicada en operaciones de construcción, determina: puntos, líneas, pendientes, elevaciones de control, posiciones horizontales para las estructuras (Wolf, 2016).

Para estos levantamientos, se establece un alineamiento, la pendiente y la línea de referencia del sitio de construcción. El proceso se puede realizar usando estacas y distancias horizontales, pero también se está empleando Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS: Global Navigation Satellite System).

Todo individuo que intervenga en el proceso de construcción (planeación, diseño y edificación) debe conocer las diferentes herramientas, y como estas ayudan a determinar las curvas horizontales, verticales y el cálculo de volúmenes.

### ***Equipo especializado para levantamientos de construcción***

Actualmente los instrumentos simplifican y aumentan la velocidad de los levantamientos de construcción, entre estos se encuentran: rayo láser visible, estaciones totales con dispositivos no reflejantes y escáneres láser (Wolf, 2016).

#### **Instrumento de rayo láser visible.**

El rayo láser efectúa mediciones de distancia y pendientes por medio de una línea visible. Se pueden identificar dos tipos:

El láser de rayo simple, proyecta líneas de referencia horizontal y vertical, y se puede combinar con instrumentos de medición como la estación total para diversificar las aplicaciones de trazo de la construcción.

Los láseres de rayo rotatorio, son láseres de rayo simple que cuentan con dispositivos ópticos de rotación.

### **MED de láser de pulsación.**

Miden ángulos horizontales, verticales y distancias inclinadas. Estas características están incluidas en algunas estaciones totales que incluyen Medición Electrónica de Distancias (MED).

### **Escáneres de láser.**

Se usan escáneres láser para capturar datos, creando una nube de puntos a densidades variables, con coordenadas tridimensionales. Luego de realizar las mediciones se puede usar la información para analizar la estructura.

### ***Causas de error en levantamientos de construcción***

Se presentan errores comunes en el levantamiento de construcciones debido a:

- 1) Número e identificación inadecuados de puntos de control en el sitio de construcción.
- 2) Errores en la determinación de controles.
- 3) Errores de medición en el trazo.
- 4) Errores en el trazo de ángulos o prolongación de líneas y errores al revisar la verticalidad de construcciones por vuelta de campana del anteojo.
- 5) Marcas de referencia descuidadas de puntos claves.
- 6) Corrimiento o alteración de estacas y otras marcas.

## **Sistema global de navegación satelital- GNSS**

Nació del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que se fundamenta en el uso de señales transmitidas por satélites, el desarrollo de estos sistemas, ha permitido implementar un sistema que brindan información de posicionamiento y sincronización precisa, de confiabilidad alta y de bajo costo.

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), se define como un sistema continuo, de precisión alta que cuenta con una técnica de microondas, funcional en todo clima en tiempo real, con señales que van a través de la atmosfera de la Tierra. Cada satélite emite ondas de una longitud aproximada de 20 cm, señales de dos o más frecuencias en la banda L (1- 2 GHz).

El centro de control del sistema realiza tareas como: mide la posición de cada satélite, envía información para una alineación del reloj, monitorea señales transmitidas y envía información a los satélites para el mensaje de navegación. Además, la parte del usuario, corresponde a los receptores GNSS que permiten estimar la posición de los aparatos por medio del procesamiento de señales satelitales.

El GNSS necesita mínimo de cuatro satélites para calcular tres tipos de coordenadas de posición, el error del reloj, y así estimar la posición, velocidad y tiempo (PVT) por triangulación (Jin et al., 2014).

### ***Aplicaciones GNSS***

Dentro del sistema GNSS se consideran las siguientes aplicaciones:

#### **Posicionamiento, navegación y cronometraje.**

Dentro de las ventajas se incluye: el posicionamiento, navegación, movimiento de placas y deformación de la corteza terrestre, rotación y variaciones de la tierra, sistemas de transporte inteligentes, agricultura de precisión, entre otros (Jin et al., 2014).

### **Percepción remota GNSS.**

Las señales GNSS se propagan a través de la atmósfera terrestre, con trayectoria curva a una velocidad levemente retardada; retraso que actualmente determina parámetros atmosféricos e ionosféricos.

### **Formato RTCM**

El RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), son sistemas diferenciales de navegación global por satélite. Busca desarrollo estándar de comunicación de radio marítima y en los sistemas de navegación electrónica (Márquez, 2016).

Los formatos de RTCM para correcciones de código y fase son:

- *RTCM 2.0:*

*Realiza correcciones de Pseudo Rango, DGPS*

*Mensajes Tipo 1,3,9, de precisión sub métrica.*

- *RTCM 2.1 Y 2.2:*

*Brinda datos de fase portadora, RTK*

*Mensajes Tipo 18,19,20,21, de precisión centimétrica.*

- *RTCM 2.3:*

*Usado en GLONASS, RTK, comienza el GNSS*

*Mensajes Tipo 18,19,20,21, de precisión centimétrica.*

- *RTCM 3.0:*

*Mensajes Tipo 1004, 1005, de precisión centimétrica.*

*A partir de este formato adecuado para Internet, se crea un protocolo NTRIP.*

### **GPS Ntrip**

El sistema NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) es un sistema que permite obtener coordenadas utilizando transmisiones de correcciones diferenciales, datos GPS utilizando Internet y redes de telefonía celular (Merry, 2007).

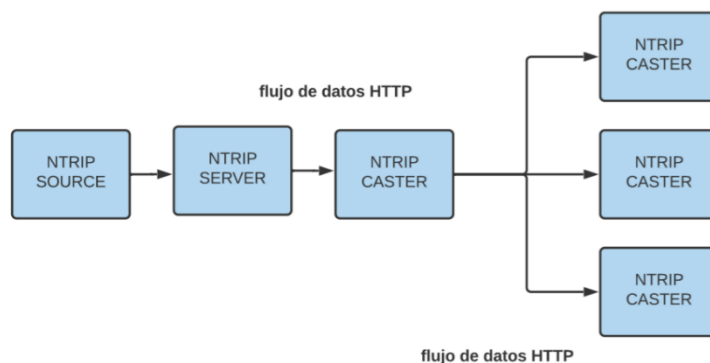
Dentro de las principales ventajas de la metodología, se encuentra la medición en tiempo real de forma simple, flexible y rápida; viable a la hora de obtener coordenadas al instante de la observación (Briceño et al., 2009).

Actualmente los algoritmos matemáticos permiten transmitir correcciones diferenciales de observaciones GPS y tratar los errores. El sistema desarrollado en Alemania calcula y transmite desde una estación de referencia conectada a Internet, correcciones diferenciales GNSS en formato RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), y el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) (Briceño et al., 2009).

Los elementos en los que se basa el sistema son:

- NTRIP Source: Fuente que procesa y envía al servidor las correcciones diferenciales en formato RTCM, de puntos materializadas por el GNSS.
- NTRIP Caster: Transmisor de correcciones GNSS a los usuarios.
- NTRIP Client: Receptor de correcciones, con información de posicionamiento preciso en tiempo real.



**Figura 1***Arquitectura del NTRIP*

*Nota.* El gráfico representa el esquema de funcionamiento del NTRIP (Briceño et al., 2009).

El servicio NTRIP tiene como institución encargada al Instituto Geográfico Militar dentro del país, brindando el servicio de manera libre y gratuita para utilizar las correcciones en tiempo real.

Los formatos de stream disponibles son RTCM 2,3 y 3,0. Además, las estaciones REGME, proporcionan el servicio de posicionamiento en tiempo real cuentan con conexión a Internet banda ancha mediante IP pública.

Dentro de las consideraciones del proyecto para la aplicación de la técnica, se tomó en cuenta la importancia de las condiciones ambientales en la zona de estudio, nivel de obstrucciones, distancia desde la estación base hasta el receptor, y beneficio de desarrollarse dentro del perímetro urbano consiguiendo cobertura a red móvil en los sitios de toma de puntos.

Los parámetros recomendados por el IGM para la aplicación de la metodología:

- La distancia máxima u óptima de operación es de 50 km, para doble frecuencia L1/L2, distancia considerada entre la estación REGME (Source Ntrip) y el cliente Ntrip, dentro de la que se obtiene solución fija.

- La distancia máxima u óptima de operación es de 20 km, para frecuencia L1, distancia considerada entre la estación REGME (Source Ntrip) y el cliente Ntrip, para obtener una solución fija.

## Figura 2

*Estación ESPE, código y estado para el servicio NTRIP, Ecuador*

Listado de estaciones con servicio NTRIP					
#	Código	Estación	Estado	RTCM2	RTCM3
12	EPEC	ESPE	ACTIVA	EPEC2	EPEC3

*Nota:* El Instituto Geográfico militar en su listado de estaciones con servicio NTRIP cuenta con 31 estaciones, ubicadas en distintos puntos alrededor del Ecuador (IGM, 2021).

## Vehículos aéreos no tripulados y Fotogrametría

### ***Vehículos aéreos no tripulados***

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), denominados como RPV (vehículos pilotados a distancia), drones, aviones robot o aviones sin piloto, son según el Departamento de Defensa (DOD) vehículos aéreos que no cuentan con un operador humano y usa fuerzas aerodinámicas para proporcionar elevación al vehículo, y poder volar de forma autónoma o ser piloteados de forma remota (Bone & Bolcom, 2003).

Un vehículo aéreo no tripulado autónomo conocido como dron, cuenta con características como: facilitar el monitoreo, bajo costo de adquisición y mantenimiento, capaz de colaborar con su sistema de comunicación a través de antenas inteligentes y cumplir las misiones asignadas en tiempos establecidos, además, volar de forma autónoma y controlada a través de software con un mando ubicado a distancia. Por lo tanto, la navegación con drones se enfoca en el desarrollo de sistemas para medir la posición y establecer una ruta eficiente de recorrido (Deebak & Al-Turjman, 2020).

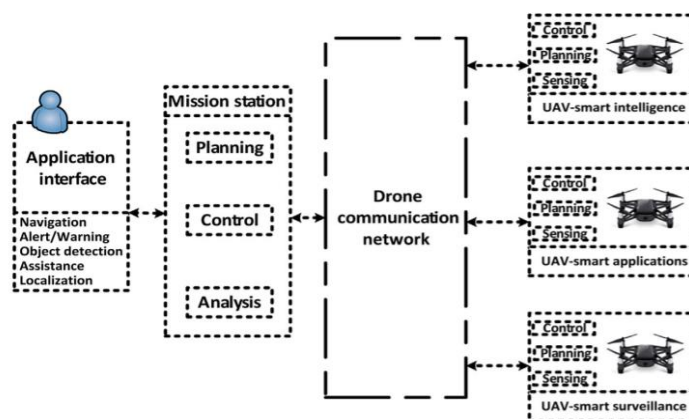
Los drones pueden realizar monitoreos de: desastres, agricultura, transporte, vigilancia, silvicultura y protección del ambiente; algunas empresas los usan para entregar productos, y la industria cinematográfica en la producción de filmes. Se emplean más UAV en aplicaciones civiles por su movilidad y flexibilidad, considerando que muchos parámetros de entorno no son detectados debido a la comunicación limitada y la capacidad de los sensores, por lo que es necesario un método más eficiente y eficaz que brinde previsibilidad y seguridad; el control del dron depende del piloto para dar un seguimiento visual determinando la posición y orientación. Además, drones avanzados utilizan receptores de sistema de posicionamiento global (GPS) que les permite navegar y un bucle de control, de esta forma ejecuta la trayectoria predeterminada en la ruta GPS usando el piloto automático; y otros cuentan con memorización para rastrear el seguimiento de posición (Deebak & Al-Turjman, 2020).

### ***Navegación***

Actividad o proceso para determinar con precisión la posición de un punto y los planes para seguir una ruta previamente establecida (Deebak & Al-Turjman, 2020).

### **Figura 3**

*Diseño de alto nivel para comunicación con drones*



*Nota:* Diagrama de control de dron obtenido de (Deebak & Al-Turjman, 2020).

### ***Fotogrametría SfM***

La fotogrametría de rango cercano es una técnica que permite obtener datos métricos mediante fotografías. Una metodología que ha evolucionado gracias algoritmos Structure from Motion (SfM), y que permite obtener desde superficies sencillas hasta las más complejas con la ayuda de un proceso automatizado que utiliza imágenes para generar nubes de puntos, mallas de triángulos y los materializa digitalmente en modelos 3D texturizados (Peña, 2019).

La fotogrametría actual se basa en 4 puntos principales:

- El primero es los algoritmos y su desarrollo, identificando características a partir de imágenes determinando puntos de forma automática en un tiempo reducido.
- En segundo lugar, el software a partir de los parámetros establecidos reconstruye la escena de cada imagen junto a los puntos homólogos, con dicha característica se puede realizar estimaciones iniciales de las posiciones de la cámara y las coordenadas del objeto, que luego se reajustarán con el fin de disminuir los posibles errores.
- El tercer punto, es que las diferentes posiciones de la cámara derivan en una nube densa de puntos, es decir, los algoritmos de forma automática obtienen nubes de puntos, mallas de triángulos y, entregan como producto un modelo texturizado tridimensional completo.
- El cuarto y último punto, la increíble vinculación con la tecnología y el avance a través de la computación, siendo una metodología de coste favorable, aplicación en tiempo reducido, y obtención de modelos de resolución muy alta.

### ***Modelo Digital de Elevaciones (MDE)***

Representación de la elevación de la superficie a base de datos numéricos que se distribuyen en el espacio (Ibáñez Martínez et al., 2008).

### ***Modelo Digital de Superficie (MDS)***

Representación de altura de la superficie, considerando el terreno, edificios, vegetación, entre otros elementos que se encuentran en la zona de análisis, generados a partir de los datos numéricos que son distribuidos en el espacio (Ibáñez Martínez et al., 2008).

### ***Modelo Digital de Terreno (MDT)***

Representación de la altura de la zona de análisis sin considerar árboles o complementos adicionales, es decir, el terreno, generado a partir de la información numérica adquirida (Ibáñez Martínez et al., 2008).

### ***Escala de trabajo y Ground Sample Distance (GSD)***

Ground Sample Distance(GSD) o resolución geométrica, es el tamaño del fragmento de terreno que se representa en cada pixel en una fotografía, y es aplicable dentro de la fotogrametría ya que me indica la escala del trabajo, por ello que previo a una planificación, se determine el GSD máximo requerido o de trabajo (Peña, 2019).

En la documentación se puede utilizar distintas escalas definiéndolas por zonas y el interés de cada una en que la resolución sea mayor, pero es importante determinar la tolerancia del error métrico que se espera en el trabajo, y para fotogrametría Sfm, la elevación de los puntos es un tema objetado. Por lo que se considera al error igual al GSD en planimetría, y para la componente vertical el doble o triple del mismo.

### ***El sensor, la cámara fotográfica***

Entre la variedad cámaras que se encuentran en el mercado, se reconocen tres tipos: las métricas, no métricas y semimétricas. Las cámaras métricas o semimétricas permiten reconstruir la geometría de la escena a partir de marcas ubicadas en las esquinas o los bordes de la fotografía (fiduciales), mientras que las no métricas o cámaras convencionales cuentan

con una geometría interna desconocida, por lo que necesita de parámetros de orientación internos para extraer información métrica (Peña, 2019).

En la actualidad, la fotogrametría SfM orienta la cámara en función de las imágenes del objeto sin el requisito de una calibración. Además, permite la calibración inversa de todo tipo de cámaras. No obstante, se recuerda que el sensor a elección va a tener influencia en los resultados que obtengamos, pero seguramente pronto dejará de ser muy importante en los modelos (Peña, 2019).

Respecto las características de la cámara fotográfica es importante considerar el tamaño, resolución del sensor, tamaño de la focal y calidad de lente. Además, una distancia focal fija, mejorará significativamente la precisión en el conjunto de datos (Mosbrucker et al., 2017).

### ***La red fotogramétrica***

La fotogrametría actualmente depende del diseño de la red. Así pues, luego de definir las variables de resolución espacial (GSD), definidas las características de la cámara, es importante planificar la toma de fotografías, para que el conjunto de datos a obtenerse contenga la información adecuada para un modelo 3D con calidad métrica, geométrica, visual o radiométrica (Peña, 2019).

Además, el software actual corrige defectos de balance de color en las imágenes, pero se debe tener presente factores importantes como la distancia entre la cámara fotográfica y el objeto, el solape, limitaciones del entorno, orden de imágenes o la cobertura.

Asimismo, variables importantes como la cantidad de la luz limitaran la velocidad de obturación, la sensibilidad, apertura de diafragma en la realización de los modelos. Para trabajos como el tratado en la presente investigación o de patrimonio arquitectónico, están restringidos por la altura del elemento a modelar ya que implica la utilización de sistemas de

elevación de la toma, obteniendo fotografías desde perspectivas superiores que fortalecen la red y capturan elementos que no pudieron ser capturadas correctamente desde el nivel del suelo. Los dispositivos de estabilización ayudarían a la obtención de modelos más favorables, pero afectaría los tiempos de ejecución, un punto importante de la metodología (Peña, 2019).

### ***El sistema de orientación y escalado de las escenas***

Los puntos de control, son puntos de coordenadas conocidas, y que pueden ser identificables en las imágenes tomadas con la cámara, con dos objetivos: el primero escalar y el segundo orientar el modelo 3D en el espacio. Esta red de puntos de apoyo está del uso de equipo topográfico que disminuye la velocidad de ejecución de la técnica. Además, el modelo con las medidas de referencia permite escalar y orientar con una precisión aceptable (De Reu, 2018).

### ***Variables y configuraciones del SfM***

El software que permita procesar las imágenes es un detalle muy importante a la hora de obtener resultados de calidad, con un rendimiento óptimo en el modelo. Actualmente existe un catálogo de motores de procesamiento en la nube como: ARC3D, Photosynth, 123D Catch, evolucionando hasta los más profesionales que están complementados con algoritmos SfM como: Pix4D, Photomodeler Scanner, MetaShape, entre otros (Peña, 2019).

Estos softwares permiten al usuario influir en la calidad de los modelos, pero sí de considerar parámetros adicionales se habla, es necesario de conocimientos específicos. La calidad al ser un parámetro de gran relevancia está presente en el software cloud computing y en algunas fases de procesado en software desktop, y es representado por *imágenes piramidales*, es decir imágenes tomadas en diversas escalas, agilizando el procesamiento del software por medio de las reducciones de resolución, ya que la optimización puede darse por altas capacidades computacionales o las opciones en la nube de documentación masiva.

## Tipo de misiones fotogramétricas

Los softwares de procesamiento se rigen a operaciones por defecto (Pix4D, 2021), a continuación, se presentarán los tipos de misiones considerados uno de los softwares comercialmente más usado en el campo de la fotogrametría.

Los tipos de misiones son:

- Red: Genera una ruta de vuelo que sigue la una orientación rectangular, superponiendo las imágenes para una obtención de datos óptima.

Se puede observar el vuelo tipo red en la Figura 4.

- Rejilla doble: También llamada doble malla, es una misión similar al tipo red, que usa dos vuelos consecutivos de forma rectangular, con una obtención superior de datos detallados, que necesita de una distancia menor entre la zona de levantamiento y del dispositivo de captura de imágenes. Es importante considerar que, la cantidad de información obtenida es proporcional al tiempo de procesamiento.

Se puede observar el vuelo tipo rejilla doble en la Figura 4.

- Polígono: Operación que permite limitar de manera flexible el vuelo, con una metodología similar al mapeo, asegurándose que las imágenes estén superpuestas. Usada generalmente para superficies planas, creación de mapas en 2D, ortomosaico, y terrenos de formas complejas que limiten la misión.

Se puede observar el vuelo tipo polígono en la Figura 4.

- Circular: Misión basada en el vuelo elipsoidal, rodeando la estructura y que se capturen imágenes desde distintos ángulos, superponiéndose adecuadamente, además de contar con la información suficiente para obtener modelos detallados, en un procesamiento óptimo.

Uso general en la generación de modelos 3D en objetos aislados, que obtiene la nube de puntos en objetos y crea de mallas en áreas restringidas.



Se puede observar el vuelo tipo circular en la Figura 4.

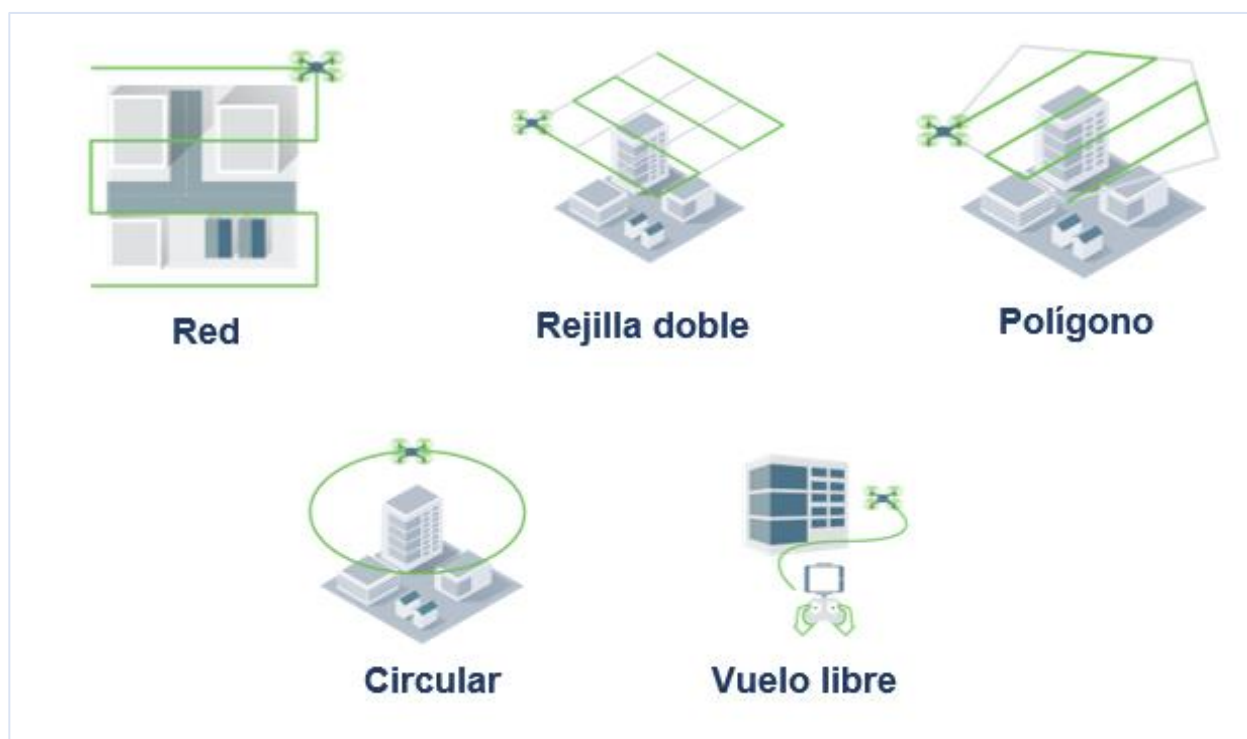
- Vuelo libre: Misión que permite obtener fotografías de zonas más complejas y que requieren mayor flexibilidad. La cámara es activada automáticamente en intervalos de tiempos que están definidos por la distancia horizontal y vertical. Además, se debe considerar que el vuelo se lo realiza en modo manual.

Se puede observar el vuelo libre en la Figura 4.

Los 4 primeros tipos presentados permiten misiones automáticas, mientras que el vuelo libre puede operarse de forma semiautomática.

#### Figura 4

*Tipos de misiones con dron*



*Nota:* La imagen indica los tipos de misiones aplicables a la generación de modelos 3D.

Recuperado de (Pix4D, 2021).

## Indicadores de calidad geométrica

Existe una normativa de procedimiento estándar para fotogrametría aérea, que define el esquema para la obtención de metadatos y su descripción de imágenes y datos cuadrículados (ISO 19115-2:2009, 2010). Además existe el sistema basado en el cálculo de la calidad medida que utiliza puntos de contraste reales (True Check Points, TCPs) y obtiene puntos fotogramétricos, para ello es necesario una estación total, aunque existen tecnologías mucho más específicas (Abd Elbasit, 2009).

Es importante diferenciar los puntos de apoyo terrestre (GCPs) y los puntos de contraste fotogramétrica (Photogrammetric Check Points, PCPs).

Los GCPs interviene en los parámetros internos y externos de las cámaras del ajuste fotogramétrico mejorando su calibración, además de no ser considerados en la evaluación de resultados; mientras que los PCPs, permiten el control de calidad geométrica luego de realizar el ajuste fotogramétrico (Chandler et al., 2003).

Existen dos métodos empleados para el establecimiento de la calidad; el primero es el marcado de puntos sobre las imágenes del trabajo, analizando por restitución discreta sobre los emparejamientos estereoscópicos, y el segundo, marcando puntos en el modelo 3D texturizado. Además, se puede evaluar la calidad geométrica en modelos digitales de elevación (MDE), a través de los modelos de elevación para el control altimétrico o de profundidad.

Finalmente, si se quiere comprobar la calidad de medida (MQ, metric quality), se necesita de procedimientos estadísticos que determinen las diferencias en dos parámetros de contraste, es decir los TCPs y los PCPs. Estas dos medidas deben estar en el mismo sistema espacial de coordenadas, y así obtener el error en cada componente, considerando al error como la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los errores anteriores. El cálculo del error entre TCPs y PCPs por medio de la medición de distancias entre dos puntos, necesita como

requisito que el modelo se encuentre escalado, y no es necesario que se encuentre georreferenciado (Peña, 2019).

En conclusión, para obtener un valor final representativo de la calidad global del método fotogramétrico es necesario un tratamiento estadístico de todos los puntos comparados. La media aritmética es la metodología más utilizada para estimar el error entre distancias como en coordenadas (Guidi et al., 2003).

Por otro lado, se usa la desviación estándar o desviación típica para determinar la estimación de la precisión, y finalmente es importante proporcionar la estimación del error de modo relativo al tamaño del objeto referenciado este a la diagonal principal del mismo (Peña, 2019).

### **Precisión de posicionamiento geoespacial**

La manera de determinar la validez y calidad de los resultados obtenidos al generar modelos de elevación se realizan cálculos estadísticos para estimar el error de los resultados generados por los puntos georreferenciados y sus homólogos.

Parte importante de la generación de MDE a partir de fotogrametría es comprender que el trabajo va a contener errores, aunque pequeños, pero existen, y estos pueden ser provocados por el sistema o accidentales, causados posiblemente por la planificación del vuelo, o el procesamiento de imágenes en los diferentes softwares.

Encasillando a los errores del sistema debido a la precisión del GPS con el que se tomaron los puntos de control, posible presencia del viento mientras se realiza la fotogrametría, capacidad de pilotaje autónomo o calidad de sensores, precisión geométrica de la cámara debido a la distorsión del objetivo.

Los errores accidentales pueden estar causados por la calibración de parámetros internos de la cámara, porcentaje de traslape bajo en las imágenes, enfoque de la cámara durante el vuelo,

número de puntos de control y su distribución en el área de análisis, además, la identificación inadecuada de los puntos de georreferenciación del modelo.

### ***Indicadores de calidad visual***

La calidad visual se basa en la resolución geométrica (GSD) con la que fueron obtenidas las imágenes para la generación del modelo fotogramétrico. Para evaluar la calidad visual del modelo es necesario estudiar la presencia de errores tanto en la textura de las zonas sin documentar fotogramétricamente, como con deformaciones, ya que el software completa la información estirando las texturas; también, puede producirse una doble proyección al aplicarse dos veces la textura, la primera en la parte correcta de los elementos y la otra en las zonas ocultas; igualmente, la presencia de diferencias radiométricas en el mapeado de texturas, repercutiendo la calidad estética y de realismo en el modelo 3D, a pesar de estar posicionada correctamente. Este aspecto es causado por la iluminación con la que se encuentra al momento de realizar el fotografiado, causando diferencias de color y cambios de texturas, pero si estos cambios no son significativos, el software tiene la capacidad de corregir el defecto y balancear el color. Además es importante considerar los errores de color por presencia de reflejos o brillos sobre el objeto (Trinchão Andrade et al., 2012).

### ***Indicadores de rendimiento y accesibilidad***

Se definen a continuación:

- **Tiempos y costes**

La evaluación del tiempo considera tareas como: el trabajo de campo, toma fotográfica. El establecimiento de la red de GCPs si bien es fundamental en el proceso no es indispensable para la ejecución de la técnica ya que se emplea en caso de necesitar un control geométrico.

Además, se considera el tiempo de procesado y post procesado de los modelos 3D, diferenciando el trabajo que necesite del usuario y los tiempos de comunicación informática automatizada.

Los costes de ejecución consideran: el equipamiento de campo, los equipos informáticos y licencias de software, para la ejecución de procesamiento y desarrollo de tareas.

- **Adaptabilidad a zonas complejas**

Las metodologías de fotogrametría SfM o el TLS (laser escáner terrestre) obtienen datos métricos y radiométricos, pero es necesario comprobar la calidad en distintos escenarios y analizar las necesidades y limitaciones del lugar para cada metodología de ejecución, enfatizando las que requieran de trípodes, como el caso de TLS o fotogrametría en algunas situaciones.

Un indicador principal y cuantitativo es el peso de los equipos ya que los diferentes entornos pueden estar ubicados en zonas de difícil acceso.

- **Facilidad de aprendizaje**

Considera la facilidad de implementación de la técnica, y que tan asimilable y ejecutable sea por los usuarios, en especial los no técnicos como escolares aficionados o profesionales no especializados en metrología.

### ***Especificaciones del Equipo Topográfico***

#### **Mavic Pro**

A continuación, se presentan las especificaciones del proveedor de la aeronave.

**Tabla 1***Especificaciones Mavic Pro*

<b>Aeronave</b>	
Tamaño diagonal (hélices excluidas)	335 milímetros
Peso (batería y hélices incluidas)	1,62 libras (734 g) (excluye la cubierta del cardán) 1,64 libras (743 g) (incluye la cubierta del cardán)
Velocidad máxima de ascenso	16,4 pies / s (5 m / s) en modo deportivo
Velocidad máxima de descenso	9,8 pies / s (3 m / s)
Máxima velocidad	65 kph (40 mph) en modo deportivo sin viento
Altitud máxima de despegue	16404 pies (5000 m)
Tiempo máximo de vuelo	27 minutos (sin viento a una velocidad constante de 25 km / h (15,5 mph))
Tiempo máximo de vuelo estacionario	24 minutos (sin viento)
Tiempo total de vuelo	21 minutos (en vuelo normal, 15% del nivel de batería restante)
Distancia máxima de viaje total (una batería llena, sin viento)	8 mi (13 km, sin viento)
Rango de temperatura de funcionamiento	32 ° a 104 ° F (0 ° a 40 ° C)
Sistemas de posicionamiento por satélite	GPS / GLONASS
Rango de precisión de desplazamiento	Vertical: +/- 0,1 m (cuando el posicionamiento visual está activo) o +/- 0,5 m Horizontal: +/- 0,3 m (cuando el posicionamiento visual está activo) o +/- 1,5 m
<b>Control remoto</b>	
Frecuencia de operación	2,4 GHz a 2,483 GHz
Distancia de transmisión máxima	Cumple con FCC: 4,3 mi (7 km);  Cumple con CE: 4 km (2,5 mi) Cumple con SRRC: 4 km (2,5 mi) Cumple con MIC: 4 km (2,5 mi) (sin obstrucciones, sin interferencias)
Rango de temperatura de funcionamiento	32 ° a 104 ° F (0 ° a 40 ° C)
Batería	2970 mAh

Tamaño de dispositivo móvil admitido	Espesor admitido: 6.5-8.5 mm Longitud máxima: 160 mm
<b>Cámara</b>	
Sensor	1 / 2,3" (CMOS), Píxeles efectivos: 12,35 M (Píxeles totales: 12,71 M)
Lente	FOV 78,8 ° 26 mm (equivalente al formato de 35 mm) f / 2,2 Distorsión <1,5% Enfoque de 0,5 m a ∞
Velocidad de obturación electrónica	8 s -1/8000 s
Tamaño de la imagen	4000 × 3000
Modos de fotografía fija	Disparo en ráfaga de un solo disparo: 3/5/7 fotogramas Horquillado de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas horquillados a un intervalo de sesgo de 0,7 EV
Tasa de bits de video máxima	60 Mbps
Sistemas de archivos compatibles	FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB)
Foto	JPEG, DNG
Video	MP4, MOV (MPEG-4 AVC / H.264)
Tarjetas SD compatibles	Capacidad máxima de Micro SD™: 128 GB. Se requiere clasificación Clase 10 o UHS-1

*Nota:* La información presentada fue obtenida de la página oficial del fabricante de la aeronave.

Recuperado de (Dji, 2016).

### Receptora GPS R8s

A continuación, se presentan las especificaciones del proveedor del sistema.

**Tabla 2**

*Especificaciones Sistema Trimble R8 GNSS*

<b>Mediciones</b>	
Chip GNSS	Trimble Maxwell 6
Canales	440 canales
Medidas de fase GNSS	Precisión de <1 mm e ancho de banda de 1 Hz
Señales satelitales	GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5 GLONASS: L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3

	Galileo: E1, E5A, E5B BeiDou (COMPASS); B1, B2
Velocidad de posicionamiento	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz y 20 Hz
<b>Rendimiento de Posicionamiento</b>	
<b>Posicionamiento GNSS diferencial de código</b>	
Horizontal	0,25 m + 1 ppm RMS
Vertical	0,50 m + 1 ppm RMS
Precisión de posicionamiento SBAS diferencial	Típico <5 m 3DRMS
<b>Medición GNSS estática</b>	
Estática de alta precisión	
Horizontal	3 mm + 0,1 ppm RMS
Vertical	3,5 mm + 0,4 ppm RMS
Estática y Estática rápida	
Horizontal	3 mm + 0,5 ppm RMS
Vertical	5 mm + 0,5 ppm RMS
<b>Medición GNSS cinemática con posprocesamiento (PPK)</b>	
Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
<b>Medición cinemática en tiempo real</b>	
Línea base simple de menos de 30 km	
Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
Vertical	15 mm + 1 ppm RMS
RTK de red	
Horizontal	8 mm + 0,5 ppm RMS
Vertical	15 mm + 0,5 ppm RMS
Tiempo de inicialización	Típico de <8 segundos
Confiabilidad en la inicialización	Típica de > 99,9%
<b>Hardware</b>	
Dimensiones	19 cm x 10,4 cm (con conectores incluidos)
Peso	1,52 kg con batería interna, radio interna y antena 3,18 kg con componentes de arriba más jalón
Temperatura de funcionamiento	– 40° C a +65° C
Temperatura de almacenamiento	– 40° C a +75° C

*Nota:* La información presentada fue obtenida de la página oficial del fabricante. Recuperado de (Trimble, 2017b).

### **Estación total M3**

A continuación, se presentan las especificaciones del proveedor del sistema.



**Tabla 3***Especificaciones Estación total M3*

<b>Características Técnicas</b>	
Precisión (Desviación estándar ISO17123-3)	5"
Sistema de lectura	Codificador absoluto
Diámetro del círculo	62 mm (2,4 pulg)
Ángulo horizontal / vertical	Diamétrico
<b>Medición de distancia sin Prisma</b>	
Modo sin reflector	300 m
Precisión	± (3+2 ppm x D) mm
<b>Medición de distancia a Prisma</b>	
Con un solo prisma	1,5 m a 5.000 m
Precisión	± (2+2 ppm x D) mm
<b>Especificaciones Generales</b>	
Sensibilidad del vial de nivel circular	10' / 2 mm
Tangente/ Abrazaderas	Pantalla 1 – QVGA, color de 16 bits, LCD TFT, retroiluminada (320 x240 pixeles) Pantalla 2 – retroiluminada, LCD gráfica, (128 x64 pixeles)
Plomada láser	4 niveles
Memoria de puntos	128 MB RAM, memoria Flash de 128 MB
Peso (incluye maleta de transporte)	6,3 kg
Temperatura de funcionamiento	-20 °C a +50°C

*Nota:* La información presentada fue obtenida de la página oficial del fabricante. Recuperado de (Trimble, 2017a).

### **Base Legal**

El presente proyecto de investigación se ampara en el nuevo reglamento que norma la Operación de Aeronaves a Distancia (RPAs), la cual aplica en las distintas operaciones de aeronaves pilotadas a distancia usados en actividades civiles, los tipos de personas que pueden operar una RPA, las prohibiciones de operación y las reglas que no serán aplicables (Dirección General De Aviación Civil, 2020). Por lo que la importancia de esta investigación

radica en que el encargado de la toma de fotografías a través de un vehículo no tripulado realice la práctica cumpliendo la norma establecida para la correcta ejecución del proyecto.

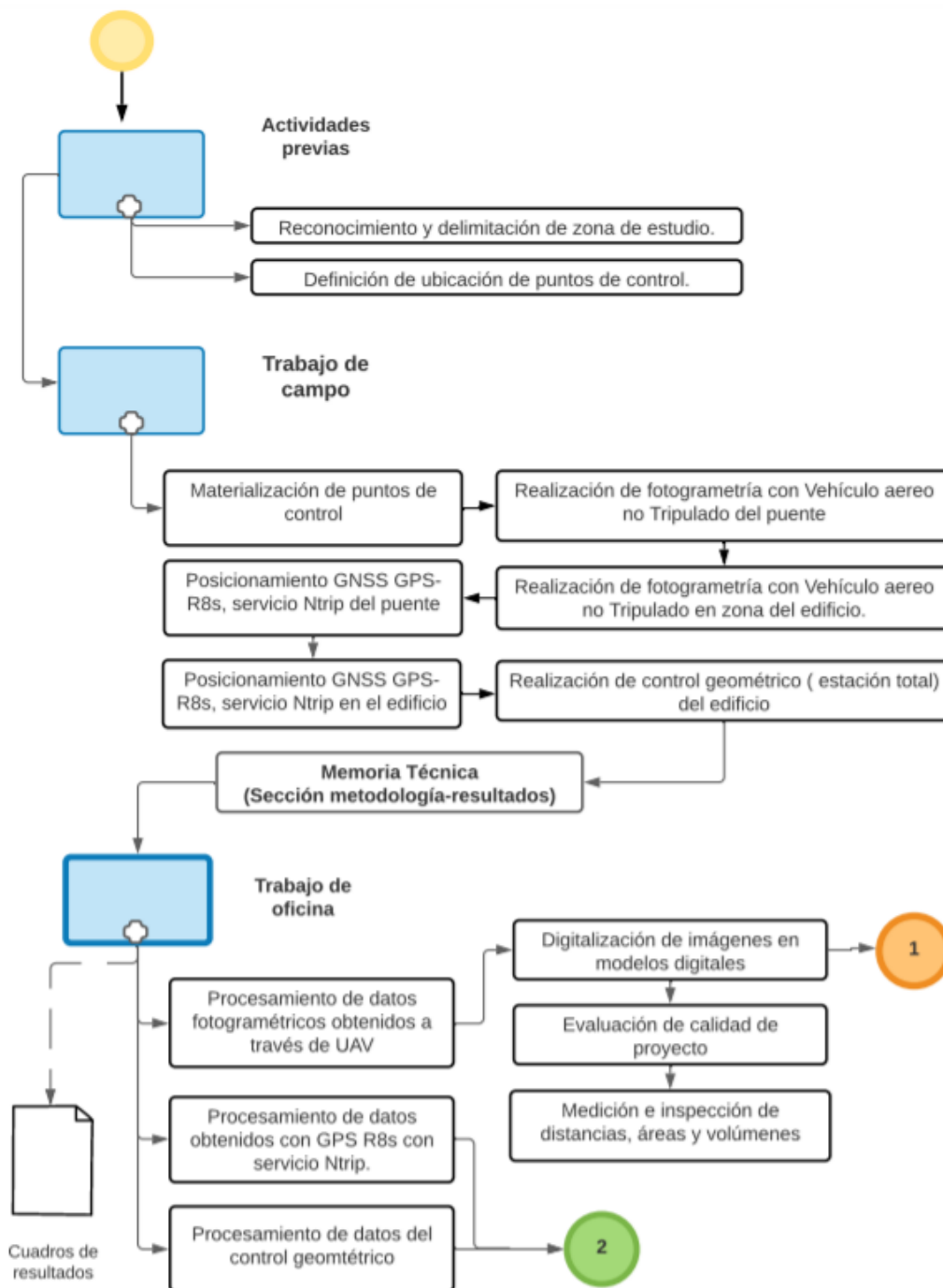
Además, el presente documento puede ser un insumo que respalde el fiel cumplimiento del Manual de Buenas Prácticas en la Contratación Pública para el Desarrollo del Ecuador, para la supervisión y seguimiento a la ejecución de los contratos, debe controlar, supervisar y vigilar la ejecución de los contratos, respaldando su trabajo (SERCOP, 2015). Al igual que un instrumento que ampare a fiscalizadores de obras, en la verificación de las cantidades y medidas de obra realizada en función de los trabajos autorizados (Contraloría General del Estado, 2009). De esta manera esta investigación resulta indispensable para la generación de modelos digitales con precisiones adecuadas para los fines de fiscalización orientadas al control de obras civiles.

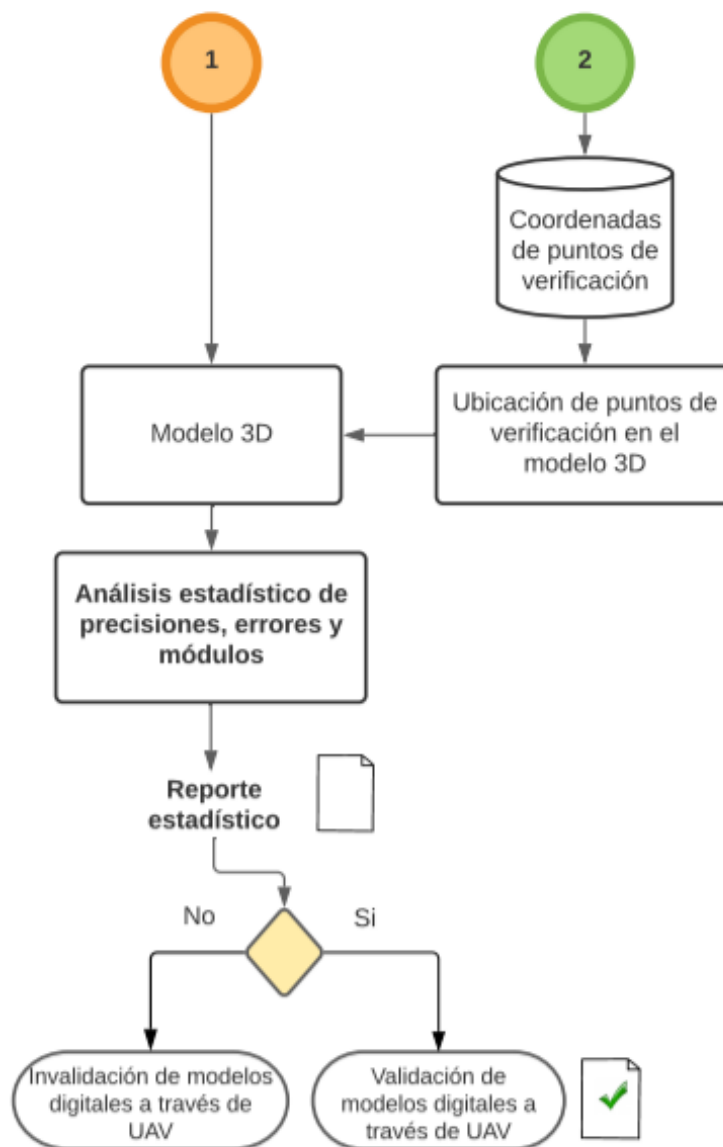
## Capítulo III

### Metodología

**Figura 5**

*Diagrama de metodología para la validación de modelo digital*





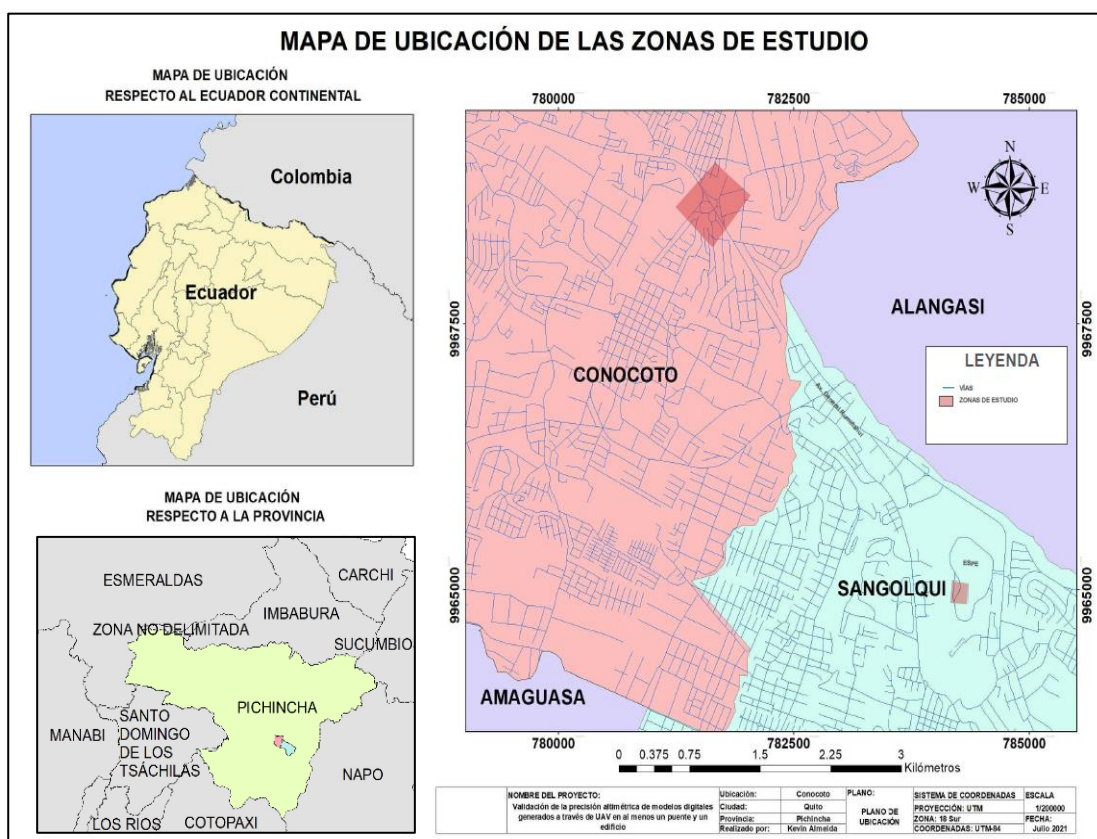
### Descripción de las áreas de estudio

Para el correcto desarrollo de la presente investigación, se analizará dos zonas de estudio, la primera, el nuevo Centro de Investigaciones Científicas y Post Grado de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, ubicada en Sangolquí, Provincia de Pichincha, Ecuador, a 22 kilómetros al Sur-Este de la ciudad de Quito entre las coordenadas geográficas

0°19'4" y 0°19'10" de latitud sur, y 78°26'46" y 78°26'52" de longitud oeste. Estructura que cuenta con las características adecuadas para la realización de fotogrametría, con presencia de irregularidades geométricas en fachadas, árboles que restringen la altura de vuelo, valor visual, entre otras características retadoras que serán importantes observar al momento de reconstruir la obra civil.

**Figura 6**

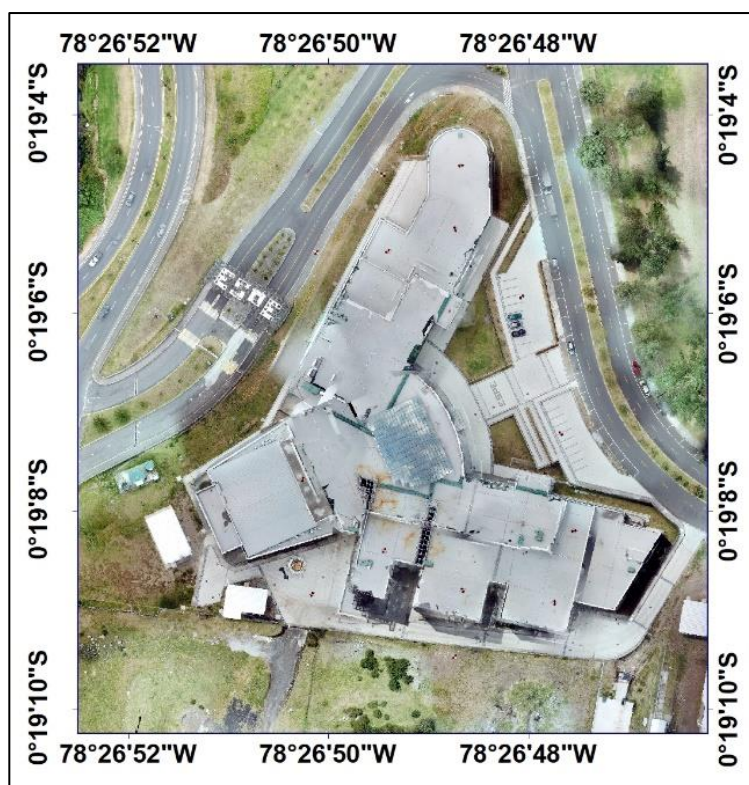
*Zona ubicación del puente Alfredo Gangotena*



*Nota:* Mapa de ubicación de las zonas del proyecto, en las parroquias correspondientes para el puente Alfredo Gangotena y el edificio del nuevo centro de Investigaciones ESPE.

**Figura 7**

*Imagen de área del nuevo Centro de Investigaciones -ESPE*

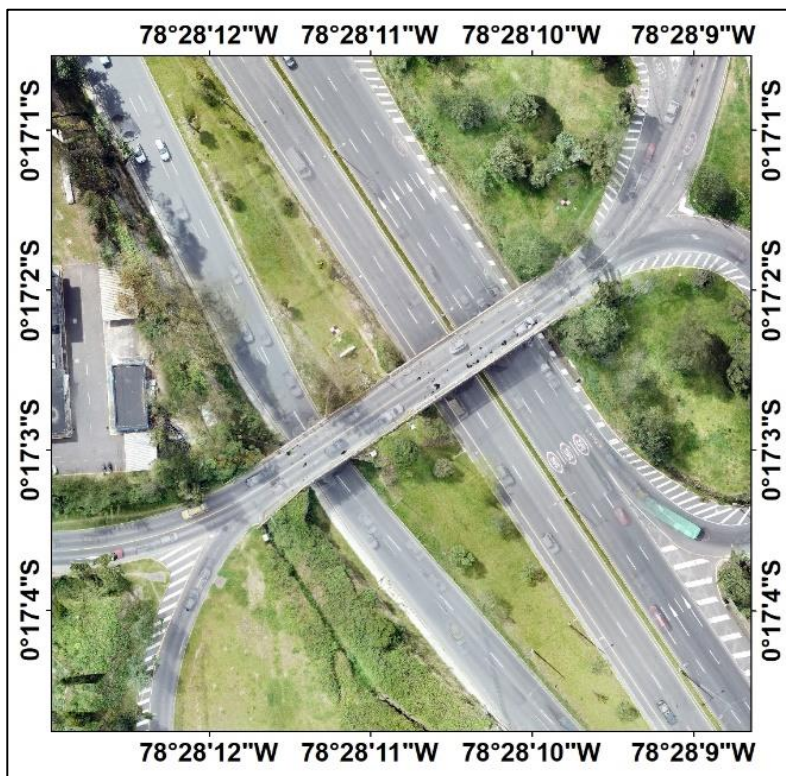


*Nota:* La imagen muestra las coordenadas dentro de las que se encuentra la ubicación del centro de investigaciones ESPE.

El segundo, es el puente que conecta la calle Alfredo Gangotena, ubicado en la parroquia de Conocoto del Distrito Metropolitano de Quito, al ser una estructura de alta concurrencia de vehículos que permite el desvío del flujo vehicular a las zonas de Conocoto y La Armenia, entre las coordenadas geográficas 0°17'1" y 0°17'4" de latitud sur, y 78°28'9" y 78°28'13" de longitud oeste.

**Figura 8**

*Imagen de área ubicación del puente que conecta la calle Alfredo Gangotena*



*Nota:* La imagen muestra las coordenadas dentro de las que se encuentra la ubicación del puente Alfredo Gangotena.

**Consideraciones y Equipo Topográfico*****Consideraciones Previas***

Para la obtención de datos métricos de los objetos en estudio, se obtuvieron fotografías que documenten las superficies complejas y a través de ellas un modelo 3D texturizado, considerando la hora en que se realizaría el vuelo del UAV y planificación de la ruta. Dichas imágenes necesitaron de puntos que permitan evaluar de manera adecuada su precisión, por lo que se marcaron sectores específicos que sirvan para el objetivo planteado.



### ***Características del Equipo Topográfico***

Para la realización se empleó: UAV multirotor Mavic Pro, Receptor GPS Trimble R8s, Estación total Trimble M3.

- Mavic Pro: Aeronave de tamaño reducido, con diseño plegable que cuenta con un sistema de transmisión OcuSync que le permite transmitir a una larga distancia con una resolución de 1080p. es capaz de enfocar hasta 0,5 m y puede girar 90° para toma de retratos y selfies (Dji, 2016).

### **Figura 9**

*Dron Plegable Mavic Pro*



*Nota:* Imagen de la aeronave Mavic Pro DJI y control remoto (Dji, 2016).

- **Receptor GPS Trimble R8S:** Es un receptor con tecnología de seguimiento Trimble 360, que se combina con un controlador Trimble y permite el ajuste de datos (Trimble, 2019).



**Figura 10***Receptora GPS Trimble R8s*

*Nota:* Imagen del receptor Trimble R8s. Recuperado de (Trimble, 2019).

- **Estación total Trimble M3:** Dispositivo topográfico, de tecnología mecánica, que permite obtener mediciones basadas en el uso del distanciómetro y el microprocesador incorporado (Trimble, 2017a).

**Figura 11***Estación total Trimble M3*

*Nota:* Imagen del receptor Trimble R8s. Recuperado de (Trimble, 2017a).

***Trabajos de campo***

Previo a realizar la toma de imágenes o el posicionamiento con la base receptora GPS Trimble R8s, se analizó la zona de medición examinando la ruta a ejecutarse por parte del UAV y que este no tenga inconvenientes a la par.

### **Reconocimiento de la zona**

Se visitó las dos zonas de estudio que acoge el proyecto. El nuevo centro de investigaciones Científicos y Post Grado de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y el puente que atraviesa la calle Alfredo Gangotena, donde se examinaron los posibles obstáculos como árboles, postes de iluminación, cables, etc., examinaron los posibles obstáculos que puede tener el UAV al momento de realizar el vuelo, y las zonas de colocación de las marcas para los puntos de control.

### **Ubicación y posicionamiento de puntos de control**

En el edificio de investigaciones ESPE se colocaron 14 puntos distribuidos de forma equivalente, buscando que abarquen los exteriores y las terrazas de la edificación, además, se realizaron mediciones de 29 puntos con estación total. Puntos que ayudarán a corroborar el modelo de elevación.

Para la materialización de los puntos de control y verificación se utilizó: clavos topográficos (zonas de concreto), varillas de  $\Phi 14$  mm de 30 cm de longitud (zonas verdes).

Luego de haber colocado los puntos de control, junto con la base receptora GPS Trimble R8s, se realizaron mediciones utilizando el servicio Ntrip, para lo cual el usuario registrado en IGS (International NSS Service) recibe señal de corrección diferencial en el dispositivo por medio de una aplicación instalada en que le permite conectarse a Internet. De esta forma, el software transfiere la comunicación y transferencia de datos GNSS a un IP del IGS, generando puntos de control terrestre.

En el puente de la calle Alfredo Gangotena se materializaron 12 puntos tratando que la zona de observación este completamente cubierta. Al igual que el edificio los puntos fueron ubicados con la ayuda de clavos topográficos, varillas de  $\Phi 14$  mm de 30 cm de longitud,

además, cruces marcadas en el piso, pintadas sobre las aceras y el asfalto que permitan el reconocimiento en las imágenes producto de la fotogrametría.

Luego de haber colocado las marcas de ubicación de los puntos que funcionarían para la referenciación y control del modelo de elevación, se generaron los puntos georreferenciados con el GPS Trimble R8s.

### **Figura 12**

*Clavo topográfico 3/8 x 3"*



*Nota:* Imagen de clavo de acero de primera calidad topográfico. Recuperado de (Riguero, 2020).

### **Figura 13**

*Paineles colocados en la terraza del edificio de investigaciones*



*Nota:* La imagen muestra el panel colocado en una zona de la terraza del edificio del centro de investigaciones ESPE, las dimensiones de las telas son de 1,50 x1,50 m.

#### **Figura 14**

*Paneles colocados sobre los puntos de control, zona del puente*



*Nota:* La imagen muestra el panel colocado en una zona de la terraza del puente Alfredo Gangotena, las dimensiones de las telas son de 1,50 x1,50 m.

#### **Figura 15**

*Configuración en campo de la colectora Trimble*



*Nota:* La imagen muestra el equipo colector Trimble de datos, utilizado para configurar el servicio Ntrip en la antena receptora Trimble R8s.

## Fotogrametría

Para el levantamiento topográfico mediante fotogrametría, es necesario la incorporación de paneles (trozos de tela de forma variada) de 1,50 x 1,50 m sobre los puntos de control, siendo cuidadoso que el centro del panel coincida con la cabeza del clavo de acero o la varilla previamente colocada.

Luego, se planifica la ruta de vuelo con la ayuda de aplicación Pix4Dcapture, afín al software de procesamiento Pix4D. La planificación permite corroborar que la zona de análisis sea cubierta en su extensión, y sea capaz de reconocer las marcas colocadas.

Se realizaron 5 vuelos, considerando diversas alturas y metodología.

**Tabla 4**

*Datos de fotogrametría realizada con UAV Mavic Pro*

Lugar	Metodología	Altura (m)	Tiempo de vuelo	Ángulo de cámara	Traslape
Puente Alfredo Gangotena	Vuelos circulares	• 35	08 min: 17 s	6°	-
		• 40	08 min: 45 s	6°	-
	Doble Malla	• 40	13 min: 56 s	70°	80%
Nuevo Centro de Investigaciones Científicas - ESPE	Vuelo Circular	• 37	10 min: 6 s	6°	-
	Doble Malla	• 45	10 min: 32 s	70°	80%
		• 45	23 min: 54s	70°	80%

*Nota:* La tabla muestra la información con la que se configuró los vuelos fotogramétricos, en el puente Alfredo Gangotena y el edificio de investigaciones ESPE.

Es importante considerar dentro de la misión fotogramétrica, ciertos parámetros que pueden afectar la toma de datos. El viento y sus ráfagas pueden provocar que cualquier tipo de

aeronave que se encuentre dentro de la capa atmosférica (1 km sobre la superficie de la Tierra) se desestabilice variando el ángulo de captura de imágenes (Watkins et al., 2020). La climatología juega un papel significativo en la metodología, la condición óptima para realizar una operación se da con cielos nubosos, manteniendo así una iluminación uniforme alrededor del objeto en análisis, contrario a lo que se cree, un tiempo soleado provocará zonas con sombra y reflejos causados por la reflexión de la luz en los ventanales (Vidal, 2020).

### **Figura 16**

*Dron Mavic Pro, en la zona del edificio*



*Nota:* La imagen muestra el vehículo aéreo no tripulado (Mavic Pro) utilizado para los vuelos fotogramétricos del puente Alfredo Gangotena y el edificio de investigaciones ESPE.

Culminado la toma de fotografías, se retiraron los paneles ubicados en los diversos sectores de las estructuras analizadas, proceso equivalente para el puente y el edificio.

### **Procesamiento en software Pix4dmapper**

Obtenidas y descargadas las imágenes, se procederá a convertir los datos bidimensionales en un modelo 3D, gracias a los millones de puntos posicionados en XYZ.

El procesamiento se lo realizó en el software de fotogrametría avanzado Pix4Dmapper, dentro de sus 15 días de prueba para la realización de trabajos con sus opciones completas.

A continuación, se especificará los pasos que permiten realizar un correcto modelamiento de obras civiles como las presentadas en la presente investigación:

1. Crea el proyecto en la selección “Nuevo proyecto”.
2. Nombra el proyecto y se selecciona la ubicación del proyecto.
3. Carga las imágenes obtenidas con el UAV y se corrobora que la geolocalización de las imágenes indicada en el programa coincida con la del proyecto. Además, que el modelo de cámara seleccionado sea el apropiado.
4. Escoge la plantilla de opción de procesamiento. Para el caso de estudio se escogió el tipo Estandar-3D Modelo.
5. Una vez cargadas las imágenes se procede al procesamiento. Selecciona opción “Procesamiento”, luego “Procesamiento inicial”, y dentro de sus configuraciones se selecciona la escala de imagen con la que se busca en el proyecto.  
Nota: La Figura 17 muestra la configuración utilizada en el proyecto.
6. Procesado el paso 1, selecciona el Gestor GCP/MTP, y se importa los puntos que permitirán la georreferenciación del proyecto.  
Nota: El formato de importación de los puntos debe ser txt.
7. Escoge la opción editar rayCloud, y se selecciona con el cursor el punto en las imágenes propuestas por el programa.
8. Completado la ubicación de los puntos se escoge “Reoptimización”, con lo que se optimiza las posiciones de la cámara y parámetros de la cámara.
9. Genero informe de calidad.

Nota: Informe de calidad del procesamiento.

10. Proceso el paso 2 “Nube de puntos y malla”, donde se escogerá el formato esperado para la nube de puntos, así como la Malla 3D con textura.

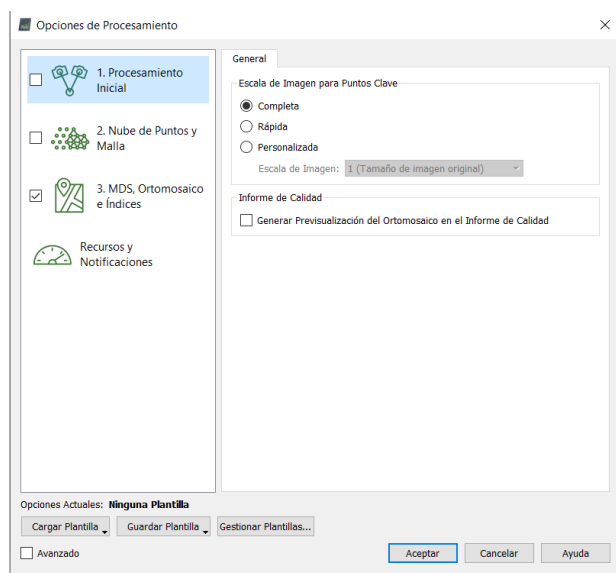
Nota: La Figura 18 muestra la configuración y los archivos exportables adicionales del presente proyecto.

11. Para finalizar el procesamiento, se genera el “MDS, ortomosaico e índices”, obteniendo por completo los productos fotogramétricos.

Nota: La Figura 19 muestra la configuración utilizada y los resultados adicionales del proyecto.

## Figura 17

Procesamiento inicial en el software Pix4dmapper

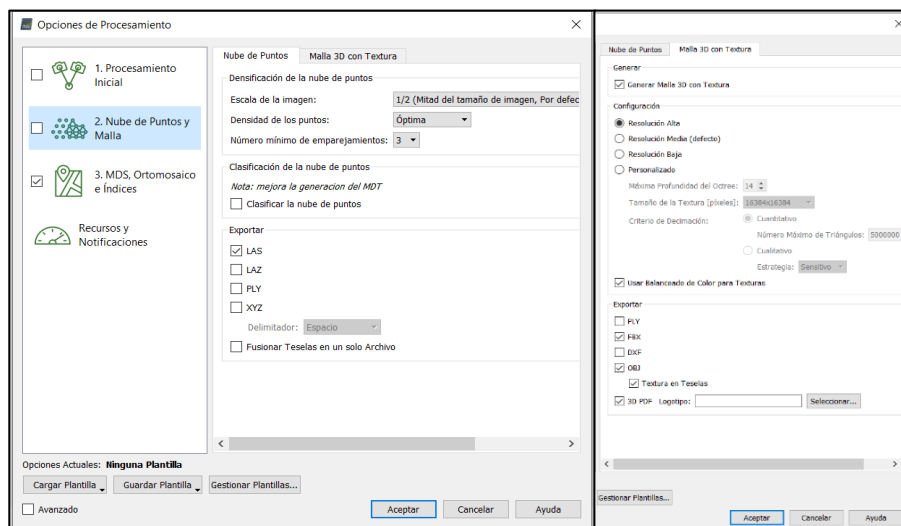


Nota: La imagen muestra el menú de configuraciones del procesamiento del software Pix4Dmapper para el “Procesamiento inicial”, y las opciones escogidas en el paso 1.



**Figura 18**

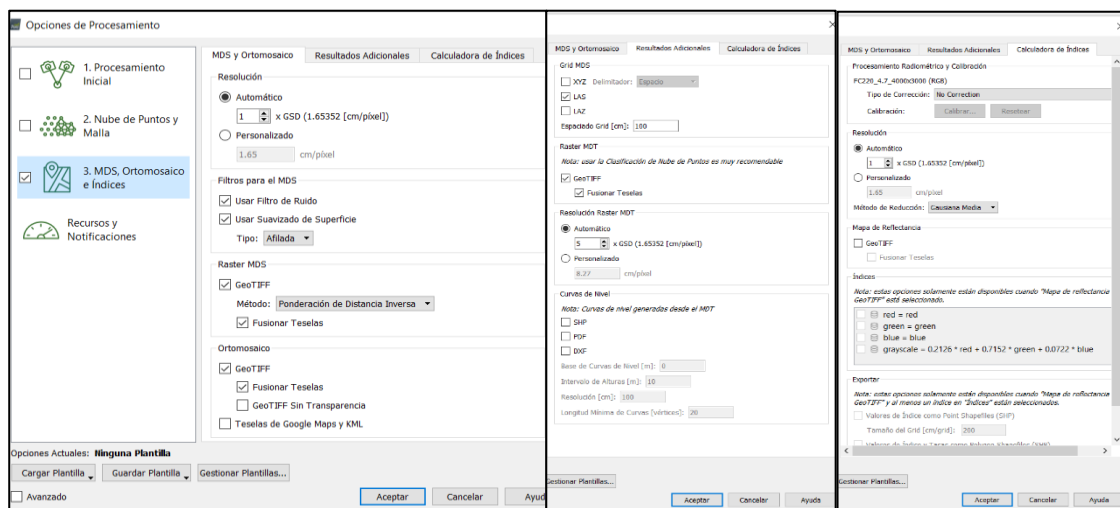
*Procesamiento de la nube puntos y malla en el software Pix4dmapper*



*Nota:* La imagen muestra el menú de configuraciones y archivos exportables del procesamiento del software Pix4Dmapper para para la generación de la “Nube de puntos y Malla”.

**Figura 19**

*Procesamiento MDS, Ortomosaico e Índices en el software Pix4dmapper*



*Nota:* La imagen muestra el menú de configuraciones y archivos exportables del procesamiento “MDS, Ortomosaico e Índices” del software Pix4Dmapper.

Durante el procesamiento culminado el paso 1, es importante que se analice el informe de calidad, consecutivamente “Reoptimizar” y en cada uno de sus procesos verificar el error en los pixeles y que el RMS se encuentra en una denominación coherente y similar a la esperada.

## Figura 20

### Informe de calidad de procesamiento

**Quality Report** Generated with Pix4Dentrap version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

**Summary**

Project	Puente_Doble Milla_1
Processed	2021-07-22 00:02:15
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.65 cm / 0.65 in

**Quality Check**

Images	median of 38850 keypoints per image	✓
Dataset	241 out of 241 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.56% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 10287.9 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.03 m	✓

*Nota:* El informe de calidad presentado es resultado del modelamiento en el software para el vuelo doble malla en el puente Alfredo Gangotena.

Obtenido el modelo de elevación, se corroborará la nube de puntos generada por el programa, además, se incluirá una representación gráfica de los tiempos para elaboración de un modelado general, partiendo de la planificación, hasta la obtención del producto definitivo.

Culminado el procesamiento de las imágenes, se utiliza el mismo para comprobar las ubicaciones de los puntos previamente obtenidos y que serán evaluados en el análisis estadístico.

A continuación, se describen los pasos seguidos dentro del programa Pix4Dmapper:

1. Ubica la zona de los puntos de verificación.
2. Posiciona los puntos con la opción puntos de paso para obtener las coordenadas de la zona señalada.
3. Obtiene las coordenadas de lugar ubicado.

Los puntos de paso colocados permitirán a futuro corroborar la validez del modelo digital, por lo que la precisión obtenida estará dictada por el informe estadístico.

### Reporte estadístico

Para el análisis del modelo digital se consideran los errores totales, desde los producidos en la planificación del vuelo, hasta los presentados en la práctica fotogramétrica. El análisis estadístico evaluó parámetros como:

- **Error Medio (EM)**

Media aritmética de los errores, parámetro que me indica el error sistemático positivo o negativo (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

$$EM = \frac{\sum_i^n C_{cal} - C_{obs}}{n} \quad (1)$$

- **Error medio cuadrático (RCME)**

Medida producto de la dispersión de la distribución de frecuencias de los residuales que es sensible a errores, es decir, muestra que tan bien se encuentra el modelo (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})^2}{n}} \quad (2)$$

- **Desviación estándar de los errores (DEE)**

Brinda información de la precisión y distribución de los residuos que se encuentran alrededor de la media (Jiménez-Jiménez et al., 2017)

$$DEE = \sqrt{\frac{\sum_i^n ((C_{cal} - C_{obs}) - EM)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

- **Error absoluto máximo (Emax)**

Indica el mayor valor residual de los datos (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

$$E_{max} = \max |C_{cal} - C_{obs}| \quad (4)$$

- **Error absoluto mínimo (Emin)**

Indica el menor valor residual de los datos (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

$$E_{min} = \min |C_{cal} - C_{obs}| \quad (5)$$

Donde:

$$C_{cal} - C_{obs} = \sqrt{(X_{cal} - X_{obs})^2 + (Y_{cal} - Y_{obs})^2} \quad (6)$$

$C_{cal}$  = coordenadas "x", "y" extraídas del modelo digital en los puntos de verificación.

$C_{obs}$  = coordenadas "x", "y" medidas con el GPS Trimble R8s.

Para la obtención de los parámetros en mención se compararon los puntos de control (PC) con las coordenadas obtenidas en los puntos de verificación (PV), obteniendo la precisión horizontal y vertical en función de las elevaciones de los mismos puntos.

La precisión del producto se calculará considerando un intervalo de confianza del 95%, el cual significa el uso de un porcentaje de confianza, que indique el error que tendrán los

puntos respecto a su posición real en elevación igual o menor del informado en la precisión, considerando la acumulación de las incertidumbres del trabajo.

Para determinar el error planimétrico se utiliza la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{RCME_{r(x,y)}} = 2,4477 * 0,5 * (RCME_X + RCME_Y) \quad (7)$$

La Fórmula 7 determina el valor de la precisión planimétrica del modelo considerando que el error medio cuadrático en “x” y “y” no es igual (NSSDA, 1998).

Para determinar el error altimétrico se utiliza dos expresiones:

$$\varepsilon_{\sigma,Z} = m \pm k * \sigma \quad (8)$$

La primera, escrita en la Formula 6, permite determinar el error considerando el sesgo del modelo ( $m$ ) y las variables  $k * \sigma$  determinarán el error accidental aleatorio. Se utilizará la recomendación de un uso de probabilidad del 95% (Ibáñez Martínez et al., 2008).

$$\varepsilon_{RCME_Z} = k * RCME_Z \quad (9)$$

La segunda, determina el valor de la precisión a partir de la mayoración del error medio cuadrático, para las diferencias en elevación (Ibáñez Martínez et al., 2008).

Donde:

$m$ = es la media de las diferencias en Z.

$\sigma$ = es la desviación estándar para las diferencias calculadas en Z.

$k = F_{N(0,1)}^{-1}(1 - \alpha)$  , valor que considera la probabilidad acumulada  $(1 - \alpha)$  ,

considerando que los errores se dispersan en una distribución normal con media cero y desviación estándar de la unidad ( $N(0,1)$ ) (Ibáñez Martínez et al., 2008).

$\alpha = (1 - P)/2$  , donde P es la probabilidad del intervalo de confianza que se va a utilizar en el proyecto.

Los valores de la variable  $k$  se obtendrán de la tabla presentada a continuación.

**Tabla 5**

*Valores de  $k$  según el intervalo de confianza*

<b>Intervalo de confianza, P (%)</b>	<b><math>\alpha</math> (%)</b>	<b>1- <math>\alpha</math> (%)</b>	<b><math>k</math></b>
68,26	15,87	84,13	1,00
85	7,50	92,50	1,44
90	5,00	95,00	1,64
95	2,50	97,50	1,96
99	0,50	99,50	2,58
99,5	0,25	99,75	2,81
99,9	0,05	99,95	3,29
100	0,00	100	$\infty$

*Nota:* La tabla muestra los valores que puede tomar  $k$  para los distintos intervalos de confianza que se vaya a utilizar para la estimación de la precisión en el proyecto. Recuperado de (Ibáñez Martínez et al., 2008).

Adicional, obtenidos los datos de la muestra, se obtendrá un histograma con las diferencias de elevación presentadas para los modelos que cuenten con mejor precisión.

## Capítulo IV

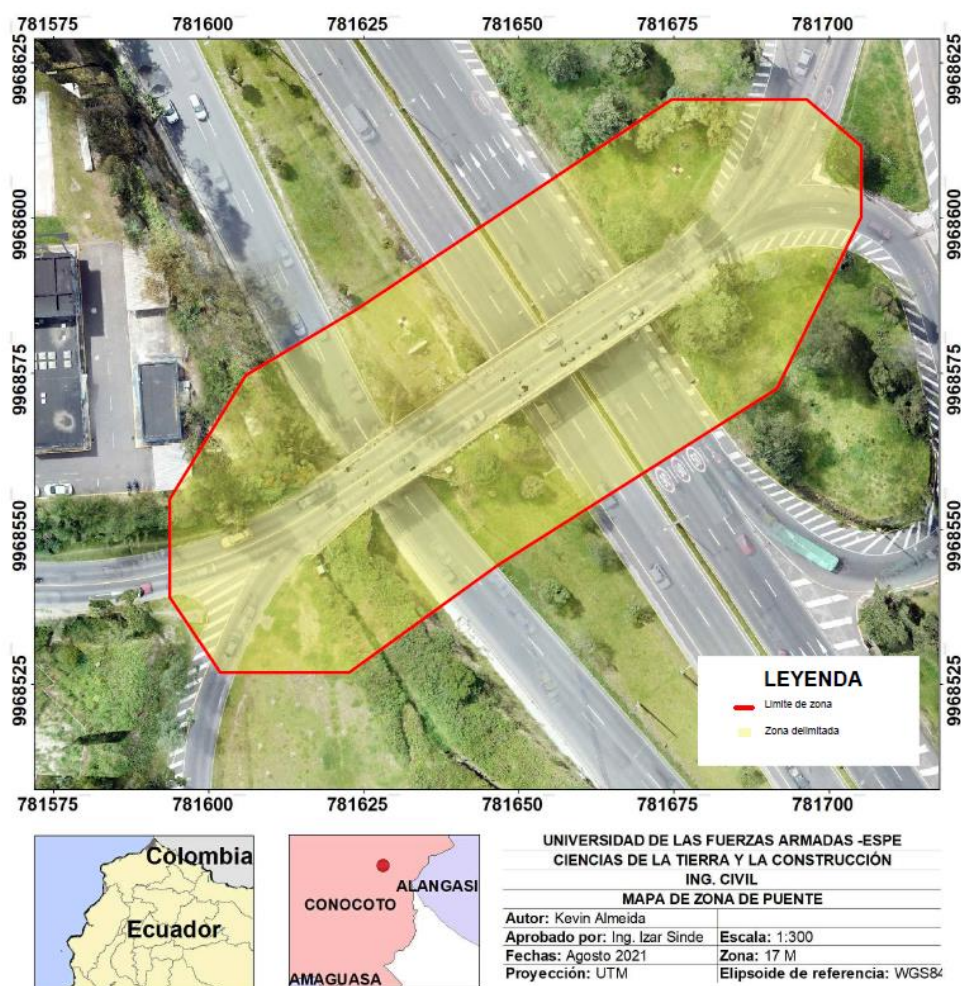
### Resultados

#### Delimitación del área de estudio

La figura 21 muestra el área de estudio analizada, donde se consideró el mayor uso de recursos para la generación del modelo.

#### Figura 21

*Mapa de delimitación de zona del puente sobre avenida Alfredo Gangotena*

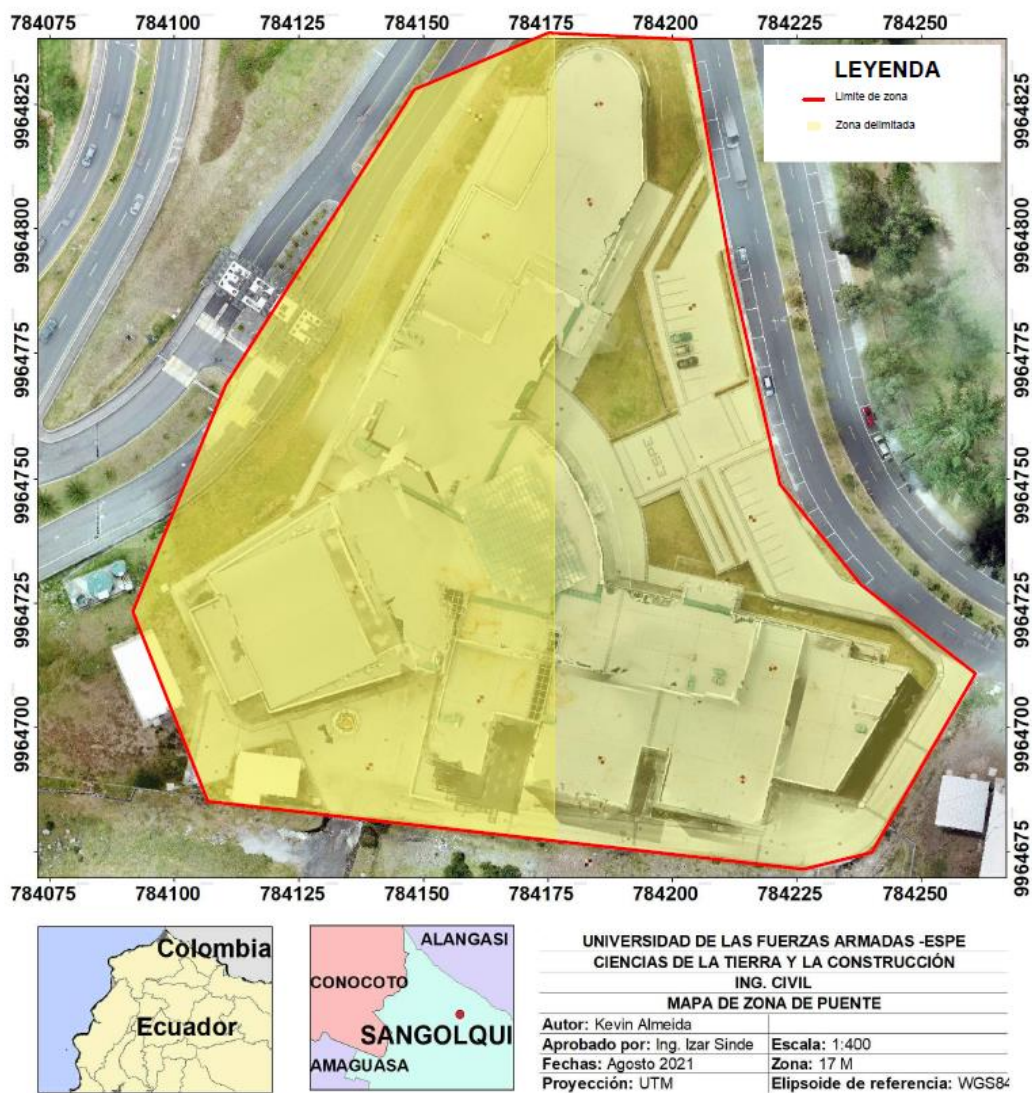


*Nota:* La imagen muestra la zona de ubicación del puente Alfredo Gangotena, delimitado por una franja roja que muestra el área de relevancia de la estructura en análisis.



Figura 22

Mapa de delimitación de zona del edificio de investigaciones ESPE



*Nota:* La imagen muestra la zona de ubicación del nuevo centro de Investigaciones y posgrados ESPE, delimitado por una franja roja que muestra el área de relevancia de la estructura en análisis.



## Fotogrametría

Culminada la fase de campo, las imágenes obtenidas con UAV son descargadas para el procesamiento en el software Pix4Dmapper, el cual permite transformar las imágenes a modelos digitales (PIX4D, 2020). Entonces se ordena las coordenadas obtenidas por el método NTRIP con el GPS TrimbleR8, puntos que servirán para la georreferenciación del proyecto.

Como resultado, se obtuvo el número de imágenes presentadas en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Imágenes aéreas obtenidas mediante fotogrametría.*

<b>Lugar</b>	<b>Metodología</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Fotografías</b>
Puente Alfredo Gangotena	Vuelos circulares	35	<b>90</b>
		40	<b>76</b>
	Doble Malla	40	<b>241</b>
Nuevo Centro de Investigaciones Científicas - ESPE	Vuelo Circular	37	<b>60</b>
		45	<b>58</b>
	Doble Malla	45	<b>411</b>

*Nota:* La tabla muestra la cantidad de fotografías que se obtuvo de los vuelos fotogramétricos para el puente Alfredo Gangotena y el edificio de investigaciones ESPE.

Luego de descargar los datos del instrumento y digitalizar los puntos de la estación total se obtuvieron las siguientes coordenadas:

**Tabla 7***Coordenadas UTM de puntos del puente*

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación (msnm)
			Este	Norte	
p00	WGS 84	17 M	781696.031	9968596.930	2494.996
p01	WGS 84	17 M	781603.354	9968541.104	2496.321
p02	WGS 84	17 M	781616.938	9968547.140	2495.803
p03	WGS 84	17 M	781646.442	9968564.722	2496.153
p04	WGS 84	17 M	781654.619	9968582.649	2495.720
p05	WGS 84	17 M	781670.129	9968592.859	2495.740
p06	WGS 84	17 M	781675.659	9968607.806	2495.878
p07	WGS 84	17 M	781631.310	9968583.314	2492.849
p08	WGS 84	17 M	781636.244	9968593.555	2489.546
p09	WGS 84	17 M	781682.151	9968564.615	2487.758
p10	WGS 84	17 M	781655.934	9968603.568	2489.564
p11	WGS 84	17 M	781696.737	9968606.091	2495.461

*Nota:* Las coordenadas presentadas en la Tabla 7, fueron obtenidas con antena receptora GPS Trimble R8s, mediante el sistema Ntrip. Estos puntos permitirán georreferenciar y verificar el modelo 3D.

**Tabla 8***Coordenadas UTM de puntos edificio*

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación (msnm)
			Este	Norte	
e00	WGS 84	17 M	784203.989	9964784.405	2494.567
e01	WGS 84	17 M	784216.040	9964742.043	2494.616
e02	WGS 84	17 M	784136.229	9964727.714	2502.040
e03	WGS 84	17 M	784162.509	9964798.502	2502.015

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación (msnm)
			Este	Norte	
e04	WGS 84	17 M	784183.432	9964805.448	2502.029
e05	WGS 84	17 M	784185.176	9964825.072	2502.050
e06	WGS 84	17 M	784185.751	9964693.366	2506.978
e07	WGS 84	17 M	784214.248	9964689.516	2506.977
e08	WGS 84	17 M	784220.312	9964711.782	2506.936
e09	WGS 84	17 M	784161.448	9964705.632	2506.995
e10	WGS 84	17 M	784161.162	9964822.303	2490.915
e11	WGS 84	17 M	784140.472	9964798.109	2488.330
e12	WGS 84	17 M	784139.166	9964692.099	2487.168
e13	WGS 84	17 M	784183.178	9964672.798	2492.786

*Nota:* Las coordenadas presentadas en la Tabla 8, fueron obtenidas con antena receptora GPS Trimble R8s, mediante el sistema NTRIP. Estos puntos permitirán georreferenciar y verificar el modelo 3D.

Además, se digitalizaron los puntos obtenidos con la estación total Trimble M3. Puntos coordenados que ayudaran a corroborar la calidad del modelo de elevación.

**Tabla 9**

*Coordenadas UTM de fachada frontal del edificio.*

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación
			Este	Norte	
ef0	WGS 84	17 M	784182.925	9964787.780	2494.890
ef1	WGS 84	17 M	784185.606	9964792.832	2494.889
ef2	WGS 84	17 M	784193.637	9964807.958	2494.877
ef3	WGS 84	17 M	784182.068	9964786.147	2502.141
ef4	WGS 84	17 M	784187.442	9964796.263	2502.134
ef5	WGS 84	17 M	784194.732	9964809.996	2502.711
ef6	WGS 84	17 M	784171.396	9964765.965	2494.062

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación
			Este	Norte	
ef7	WGS 84	17 M	784172.237	9964767.590	2498.958
ef8	WGS 84	17 M	784172.237	9964767.590	2503.889
ef9	WGS 84	17 M	784172.240	9964767.582	2508.817
ef10	WGS 84	17 M	784190.155	9964728.171	2508.833
ef11	WGS 84	17 M	784190.166	9964728.168	2503.907
ef12	WGS 84	17 M	784190.145	9964728.174	2498.987
ef13	WGS 84	17 M	784181.050	9964749.494	2495.790

*Nota:* Las coordenadas presentadas en la Tabla 9, fueron obtenidas con estación total M3 en la fachada delantera del edificio sector entrada principal. Los puntos permitirán validar el modelo de elevación una vez definida la metodología más adecuada para el edificio de investigaciones ESPE.

**Tabla 10**

Coordenadas UTM de la fachada lateral del edificio, sector garita.

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación
			Este	Norte	
eg0	WGS 84	17 M	784151.928	9964792.340	2494.042
eg1	WGS 84	17 M	784141.429	9964772.697	2494.032
eg2	WGS 84	17 M	784133.734	9964758.268	2494.053
eg3	WGS 84	17 M	784133.730	9964758.251	2503.859
eg4	WGS 84	17 M	784141.449	9964772.735	2503.889
eg5	WGS 84	17 M	784149.056	9964787.019	2503.910
eg6	WGS 84	17 M	784158.073	9964803.970	2502.089

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación
			Este	Norte	
eg7	WGS 84	17 M	784160.313	9964808.471	2502.846
eg8	WGS 84	17 M	784174.996	9964816.526	2498.941
eg9	WGS 84	17 M	784174.943	9964818.577	2493.997

*Nota:* Las coordenadas presentadas en la Tabla 10, fueron obtenidas con estación total Trimble M3, en la fachada lateral izquierda del edificio, sector de la garita del edificio de investigaciones. Los puntos permitirán validar el modelo de elevación un ves definida la metodología más adecuada para el edificio de investigaciones ESPE.

**Tabla 11**

*Coordenadas UTM de la fachada posterior del edificio, sector- terrenos ESPE*

Punto	Datum	Zona	Coordenada UTM		Elevación
			Este	Norte	
lt0	WGS 84	17 M	784158.381	9964691.223	2493.398
lt1	WGS 84	17 M	784158.393	9964691.217	2498.365
lt2	WGS 84	17 M	784158.384	9964691.206	2503.305
lt3	WGS 84	17 M	784161.413	9964690.505	2507.754
lt4	WGS 84	17 M	784170.277	9964688.537	2507.839
lt5	WGS 84	17 M	784217.710	9964680.169	2507.725

*Nota:* Las coordenadas presentadas en la Tabla 11, fueron obtenidas con estación total M3, en la fachada lateral derecha del edificio de investigaciones ESPE, sector posterior, cerca de los terrenos de la universidad. Los puntos permitirán validar el modelo de elevación una vez definida la metodología más adecuada para el edificio de investigaciones ESPE.

## Procesamiento en software Pix4dmapper

Para cada modelo de elevación se obtuvo:

- Nube de puntos densa.
- PDF 3D
- Un MDE.
- MDT
- Ortomosaico

### *Puente Alfredo Gangotena*


#### **Vuelo circular a 35 m de altura**

El reporte de calidad del procesamiento inicial determina que las imágenes cuentan con:

- **Imagen:** Escala adecuada, es decir, más de 10.000 puntos clave fueron extraídos por imagen
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** El modelo está dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.
- **Georreferenciación:** Existen GCP y el error de GSP es menor a 2 veces el GSD promedio.

Figura 23

Informe de calidad de vuelo circular 35 m de altura



## Quality Report

Generated with Pix4Denterprise version 4.5.0

**Important:** Click on the different icons for:

- ❗ Help to analyze the results in the Quality Report
- ❗ Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary ❗

Project	Puente_Vuelo Circular_1
Processed	2021-07-20 12:19:11
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	16.76 cm / 6.60 in

### Quality Check ❗

<span style="color: orange;">❗</span> Images	median of 42689 keypoints per image	✔
<span style="color: orange;">❗</span> Dataset	90 out of 90 images calibrated (100%), all images enabled	✔
<span style="color: orange;">❗</span> Camera Optimization	0.18% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
<span style="color: orange;">❗</span> Matching	median of 16435.9 matches per calibrated image	✔
<span style="color: orange;">❗</span> Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.035 m	✔

### Geolocation Details ❗

#### ❗ Ground Control Points ❗

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1 (3D)	0.020/0.020	0.002	-0.018	0.043	0.233	26 / 26
4 (3D)	0.020/0.020	0.056	-0.018	-0.028	0.183	36 / 36
7 (3D)	0.020/0.020	0.003	0.049	-0.061	0.134	62 / 62
10 (3D)	0.020/0.020	-0.054	-0.017	0.059	0.324	51 / 51
11 (3D)	0.020/0.020	-0.010	-0.009	0.021	0.242	15 / 15
<b>Mean [m]</b>		-0.000759	-0.002505	0.006709		
<b>Sigma [m]</b>		0.035118	0.028061	0.044737		
<b>RMS Error [m]</b>		0.035126	0.026181	0.045238		

*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo circular a 35 metros de altura en el puente Alfredo Gangotena.

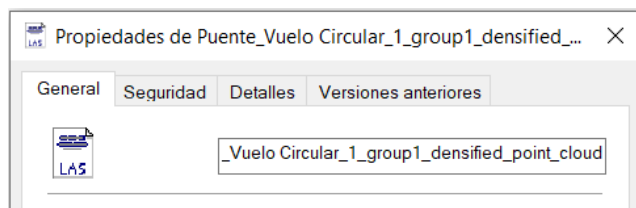
El error medio cuadrático es de 3,5 cm, número aceptable pero que se debe considerar que es calculado por el software. El error medio cuadrático general del modelo será determinado mediante parámetros estadísticos con los puntos previamente ubicados.

La nube de puntos y malla, luego de aumentar la densidad de puntos del modelo 3D, genera el archivo LiDAR que será clave en la investigación ya que nos brinda información de

posición, color para la nube de puntos y puede ser abierto en softwares comerciales para la ubicación de puntos.

### Figura 24

Archivo exportable formato LAS



*Nota:* La imagen muestra las propiedades del archivo extraíble que se genera luego del procesamiento de las imágenes generadas en el vuelo circular del puente Alfredo Gangotena.

### Figura 25

Archivo 3D, producto de la nube de puntos y malla de triángulos



*Nota:* La imagen muestra el archivo 3D generado a partir de la nube de puntos del puente Alfredo Gangotena, el exportable en formato de archivo obj. puede ser abierto en cualquier software comercial de modelado.



El MDS, Ortomosaico e índices nos permitirán obtener archivos exportables que pueden servirnos para futuras generaciones de curvas de nivel o modelos digitales de la superficie.

### **Vuelo circular a 40 m de altura**


El reporte de calidad del procesamiento inicial determina que las imágenes cuentan con:

- **Imagen:** Escala adecuada
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** Modelo dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.
- **Georreferenciación:** Existen GCP y el error de GSP menor a 2 veces el GSD promedio.

Figura 26


Informe de calidad de vuelo circular a 40 metros de altura

## Quality Report

 Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

**!** **Important:** Click on the different icons for:






- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary **i**

Project	Puente2_VueloCircular_2
Processed	2021-07-25 22:58:43
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.07 cm / 1.60 in

### Quality Check **i**

<b>?</b> Images	median of 46386 keypoints per image	
<b>?</b> Dataset	76 out of 76 images calibrated (100%), all images enabled	
<b>?</b> Camera Optimization	0.03% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
<b>?</b> Matching	median of 21677.8 matches per calibrated image	
<b>?</b> Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.034 m	

### Geolocation Details **i**

#### **?** Ground Control Points **i**

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
0 (3D)	0.020/0.020	0.107	0.043	-0.044	0.020	16 / 16
4 (3D)	0.020/0.020	0.041	-0.020	0.019	0.085	36 / 36
7 (3D)	0.020/0.020	-0.010	0.036	-0.013	0.121	38 / 38
10 (3D)	0.020/0.020	-0.035	-0.026	0.008	0.165	68 / 68
11 (3D)	0.020/0.020	0.064	0.005	-0.025	0.071	22 / 22
<b>Mean [m]</b>		0.033469	0.007483	-0.011140		
<b>Sigma [m]</b>		0.051126	0.028318	0.022659		
<b>RMS Error [m]</b>		0.061107	0.029290	0.025249		

*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo circular a 40 metros de altura en el puente Alfredo Gangotena.

El error medio cuadrático calculado por el software es de 3,4 cm. La nube de puntos y malla, 3D, genera el archivo LiDAR que será abierto en softwares comerciales para la ubicación de puntos.

#### **Vuelo doble malla 40 m de altura**


El reporte de calidad del procesamiento inicial del vuelo doble malla cuenta con:

- **Imagen:** Escala adecuada.
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** El modelo está dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.
- **Georreferenciación:** Existen GCP y el error de GSP menor a 2 veces el GSD promedio.

Figura 27

Informe de calidad de vuelo doble malla a 40 m de altura

## Quality Report

 Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

**!** **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

**💡** Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary **i**

Project	Final_Doble malla
Processed	2021-08-13 21:29:48
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.66 cm / 0.65 in

### Quality Check **i**

<b>?</b> Images	median of 38850 keypoints per image	<b>✓</b>
<b>?</b> Dataset	241 out of 241 images calibrated (100%), all images enabled	<b>✓</b>
<b>?</b> Camera Optimization	0.53% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	<b>✓</b>
<b>?</b> Matching	median of 10257.7 matches per calibrated image	<b>✓</b>
<b>?</b> Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.028 m	<b>✓</b>

### Geolocation Details **i**

#### **?** Ground Control Points **i**

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
4 (3D)	0.020/ 0.020	0.009	-0.011	-0.023	0.286	38 / 38
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.007	0.039	-0.066	0.199	50 / 50
10 (3D)	0.020/ 0.020	-0.029	-0.034	0.064	0.216	38 / 38
11 (3D)	0.020/ 0.020	0.019	0.008	-0.001	0.136	29 / 29
1 (3D)	0.020/ 0.020	0.008	-0.003	0.029	0.082	28 / 28
<b>Mean [m]</b>		-0.000099	-0.000117	0.000683		
<b>Sigma [m]</b>		0.016531	0.023883	0.044462		
<b>RMS Error [m]</b>		0.016531	0.023884	0.044468		

*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo doble malla a 40 metros de altura en el puente Alfredo Gangotena.

El error medio cuadrático calculado por el software es de 2,7 cm.

La nube de puntos y malla, luego de aumentar la densidad de puntos del modelo 3D, genera el archivo LiDAR que será clave en la investigación ya que nos brinda información de posición, color para la nube de puntos y puede ser abierto en softwares comerciales para la ubicación de puntos.

### **Figura 28**

*Archivo 3D, producto de la nube de puntos y malla de triángulos del vuelo doble malla*



*Nota:* La imagen muestra el archivo 3D generado por el vuelo doble malla del puente Alfredo Gangotena.

### ***Centro de Investigaciones ESPE***

#### **Vuelo circular a 37 m de altura**


El reporte de calidad del procesamiento inicial del vuelo circular del centro de investigaciones muestra:

- **Imagen:** Escala adecuada.
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** El modelo dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.

- **Georreferenciación:** Existen GCP y el error de GSP es menor a 2 veces el GSD promedio.

**Figura 29**

*Informe de calidad de vuelo circular a 37 m de altura*



## Quality Report

Generated with Pix4Dentprise version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:

- ? Help to analyze the results in the Quality Report
- i Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary i

Project	Edificio_circular_definitivo
Processed	2021-07-26 21:03:46
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	13.02 cm / 5.12 in

### Quality Check i

<span style="color: orange;">?</span> <b>Images</b>	median of 20475 keypoints per image	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Dataset</b>	98 out of 98 images calibrated (100%), all images enabled	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Camera Optimization</b>	0.92% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Matching</b>	median of 5886.75 matches per calibrated image	✔
<span style="color: orange;">?</span> <b>Georeferencing</b>	yes, 7 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.016 m	✔

### Geolocation Details i

#### ? Ground Control Points i

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
0 (3D)	0.020/ 0.020	-0.020	0.014	-0.006	0.192	24 / 24
2 (3D)	0.020/ 0.020	0.024	0.021	0.003	0.275	14 / 14
3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.037	-0.027	-0.003	0.158	25 / 25
4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	0.026	0.006	0.367	24 / 24
6 (3D)	0.020/ 0.020	-0.000	-0.001	0.011	0.705	18 / 18
10 (3D)	0.020/ 0.020	0.042	-0.010	-0.002	0.104	17 / 17
13 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.021	-0.010	0.281	16 / 16
<b>Mean [m]</b>		0.000949	0.000496	0.000132		
<b>Sigma [m]</b>		0.024078	0.019361	0.006785		
<b>RMS Error [m]</b>		0.024097	0.019367	0.006786		

*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo circular a 37 metros de altura en el edificio del centro de investigaciones ESPE.

El error medio cuadrático calculado por el software es de 1,6 cm.

### Figura 30

*Archivo 3D del vuelo circular a 37 m del edificio*



*Nota:* La imagen muestra el archivo 3D generado por el vuelo circular del edificio del centro de Investigaciones ESPE.


#### **Vuelo circular a 45 m de altura**

El reporte de calidad del procesamiento inicial del vuelo circular del centro de investigaciones muestra:

- **Imagen:** Escala adecuada.
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** El modelo dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.
- **Georreferenciación:** Existen GCP y el error de GSP es menor a 2 veces el GSD promedio.

Figura 31



Informe de calidad de vuelo circular a 45 m de altura




## Quality Report

Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

**Important:** Click on the different icons for:











-  Help to analyze the results in the Quality Report
-  Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

### Summary

Project	Edif_Circular_2
Processed	2021-08-14 16:14:36
Camera Model Name(s)	FC220_4.7_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	22.88 cm / 9.01 in

### Quality Check

 Images	median of 27487 keypoints per image	
 Dataset	58 out of 58 images calibrated (100%), all images enabled	
 Camera Optimization	0.7% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 9186.49 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 7 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.02 m	

### Geolocation Details

#### Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
0 (3D)	0.020/ 0.020	0.030	0.025	-0.009	0.346	20 / 20
2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.027	0.004	0.006	0.259	28 / 28
3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.049	0.024	-0.018	0.105	17 / 17
4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	0.016	0.011	0.255	24 / 24
6 (3D)	0.020/ 0.020	0.001	-0.004	-0.013	0.116	21 / 21
10 (3D)	0.020/ 0.020	0.026	-0.043	0.015	0.143	27 / 27
13 (3D)	0.020/ 0.020	0.010	-0.002	0.017	0.129	11 / 11
<b>Mean [m]</b>		-0.001455	0.002945	0.001349		
<b>Sigma [m]</b>		0.026302	0.021677	0.013306		
<b>RMS Error [m]</b>		0.026343	0.021876	0.013374		

*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo circular a 35 m de altura en el edificio del centro de investigaciones ESPE. El error medio cuadrático calculado por el software es de 2,0 cm.



**Figura 32**

*Archivo 3D del vuelo circular a 45 m del edificio*



*Nota:* La imagen muestra el archivo 3D generado por el vuelo circular a 45 m del edificio del centro de Investigaciones ESPE.

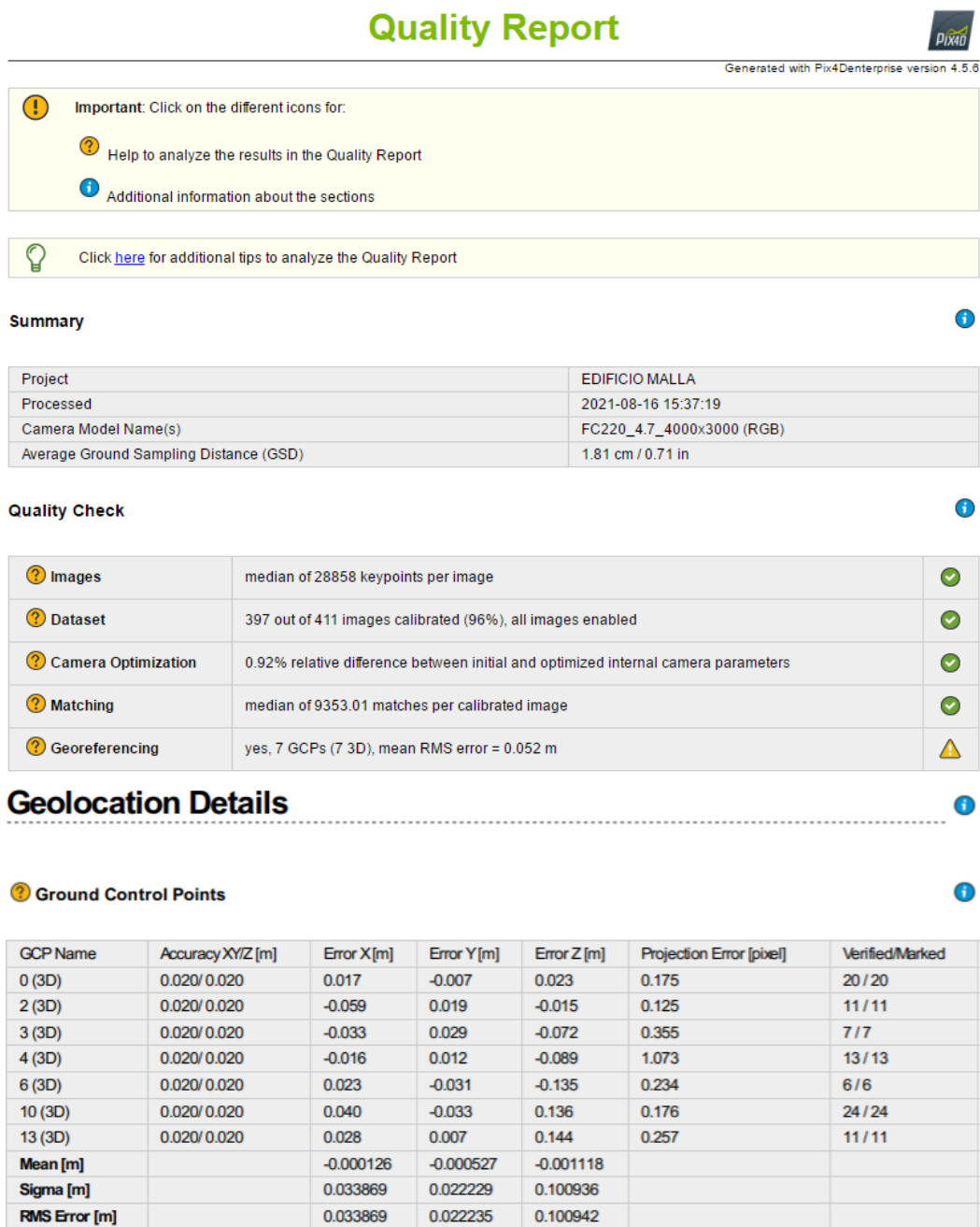
**Vuelo doble malla a 45 m de altura**

El reporte de calidad del procesamiento inicial del vuelo circular del centro de investigaciones muestra:

- **Imagen:** Escala adecuada.
- **Conjunto de datos:** Más del 95 % de las imágenes se calibraron.
- **Optimización de la cámara:** El modelo dentro del 5% admisible de optimización.
- **Coincidencia:** Nivel de coincidencias por imagen calibrada aceptable.
- **Georreferenciación:** El error de GCP es más de 2 veces el DSD promedio.

Figura 33

Informe de calidad de vuelo doble malla a 45 m de altura



*Nota:* El informe de calidad, producto del procesamiento del vuelo doble malla a 45 m de altura en el edificio del centro de investigaciones ESPE.

El error medio cuadrático calculado por el software es de 5,2 cm.

### Figura 34

*Archivo 3D del vuelo doble malla del edificio de investigaciones*

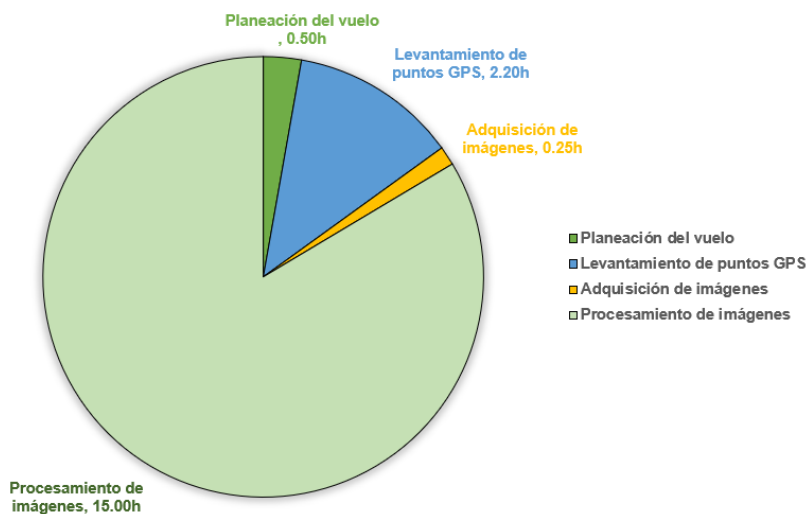


*Nota:* La imagen muestra el archivo obj. del 3D generado por el vuelo circular del edificio del centro de Investigaciones ESPE.

Adicional, se presenta un gráfico que represente los tiempos empleados en la elaboración global de los modelos del puente y edificio, para los vuelos circular y doble malla.

### Figura 35

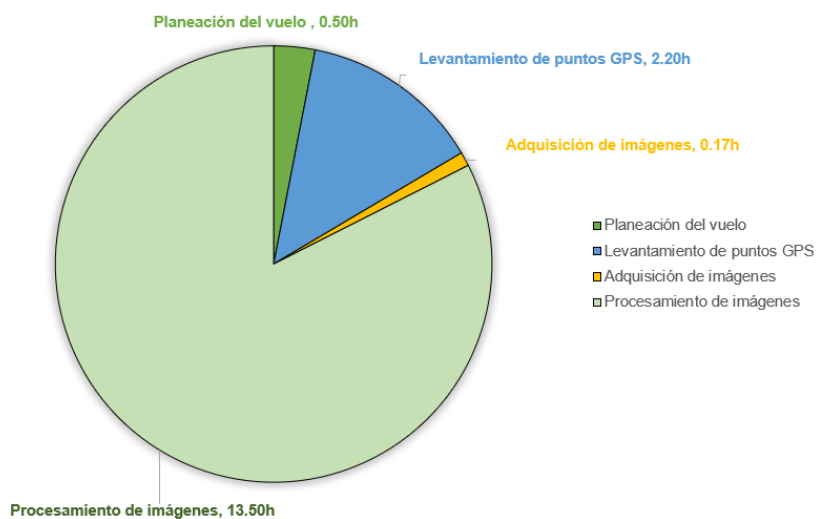
*Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo doble malla en el puente*



*Nota:* El gráfico indica los tiempos empleados para el procesamiento y toma de imágenes para el vuelo doble malla en el puente Alfredo Gangotena.

**Figura 36**

Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo circular en el puente



*Nota:* El gráfico indica los tiempos empleados en el procesamiento y toma de imágenes para el vuelo circular en el edificio de investigaciones ESPE.

Es necesario indicar que el tiempo global de elaboración de los modelos de vuelo circular a 37 y 40 metros son similares, motivo por el que son representados de manera general en la Figura 36. Además, los tiempos representan el lapso total para la elaboración de un modelo 3D de un edificio de 4 plantas de área total de construcción aproximada de 23.139,88 m<sup>2</sup>, con un computador de procesador 11th Gen Inter® Core™ i7 -11370H @3,30GHz de 16 GB de memoria RAM., con tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 3060 de 6GB, con disco duro sólido.

**Figura 37**

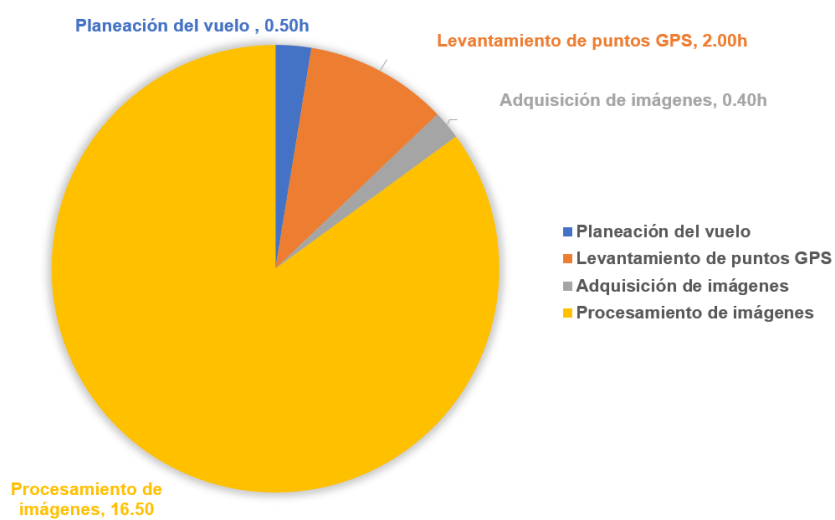
*Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo doble malla en el edificio*



*Nota:* El gráfico indica los tiempos empleados para el procesamiento del vuelo doble malla en el edificio de investigaciones ESPE, para la creación de productos.

**Figura 38**

*Tiempo empleado en flujo de trabajo del vuelo circular en el edificio*



*Nota:* El gráfico indica los tiempos empleados en el procesamiento y toma de imágenes para el vuelo circular en el edificio de investigaciones ESPE.

Es necesario indicar que el tiempo global de elaboración de los modelos de vuelo circular a 37 y 45 metros son similares, motivo por el que son representados de manera general en la Figura 38. Los tiempos representan el lapso total para la elaboración de un modelo 3D de un edificio de un puente de área aproximada de 605 m<sup>2</sup>, con un computador de procesador 11th Gen Inter® Core™ i7 -11370H @3,30GHz de 16 GB de memoria RAM., con tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 3060 de 6GB, con disco duro sólido.

## Reporte estadístico

Los resultados obtenidos de la comparación de las coordenadas de puntos ubicados en sitios de la obra civil son los siguientes:

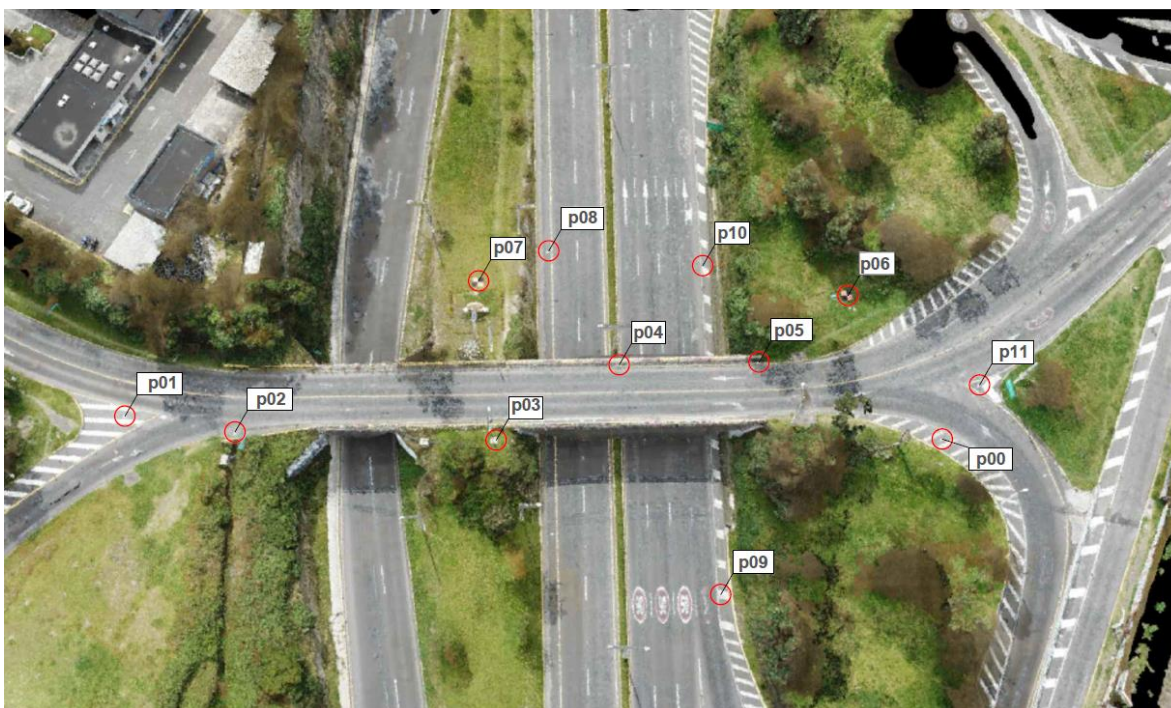
### ***Puente Alfredo Gangotena***

A continuación, se presentan las tablas de cálculos para los puntos considerados para la verificación en cada modelo.

Producto del procesamiento, el modelo 3D obtenido a partir de la nube de puntos y la malla de triangulación, será comprobado a través de tablas de cálculo, donde se comparó la precisión de los puntos de verificación obtenidos con el GPS R8s, y su ubicación homologa en el modelo digital de elevación.

### **Figura 39**

*Ubicación de puntos de control y verificación en la zona puente.*



*Nota:* La imagen muestra el modelo digital generado del procesamiento de las imágenes, sobre la que se muestra la ubicación de los puntos de control y verificación tomados en campo.

Tabla 12:

*Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, para vuelo circular a 35 m de altura.*

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	cm2
			en x (1)					en y (1)		
p02	781616,938	781616,923	-1,50	2,25	1,03	9968547,14	9968547,148	0,80	0,64	3,74
p03	781646,442	781646,444	0,20	0,04	0,47	9968564,722	9968564,773	5,10	26,01	5,60
p05	781670,129	781670,152	2,30	5,29	7,75	9968592,859	9968592,899	4,00	16,00	1,60
p06	781675,659	781675,665	0,60	0,36	1,17	9968607,806	9968607,816	1,00	1,00	3,00
p08	781636,244	781636,227	-1,70	2,89	1,48	9968593,555	9968593,597	4,20	17,64	2,15
p09	781682,151	781682,123	-2,80	7,84	5,37	9968564,615	9968564,628	1,30	1,69	2,05
			<b>-2,90</b>	<b>18,67</b>	<b>17,27</b>			<b>16,40</b>	<b>62,98</b>	<b>18,15</b>

Descripción	Z					X,Y		
	z	z	diferencia	diferencia al	(diferencia z	Ccal - Cobs	(Ccal -Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2
	(observado)	(calculado)	z	cuadrado en z	- EM) ^2			
m	m	cm	(1)	cm2	cm2	cm	cm2	cm2
p02	2495,803	2495,788	-1,500	2,250	0,090	1,700	2,890	2,779
p03	2496,153	2496,178	2,500	6,250	13,690	5,104	26,050	3,017
p05	2495,740	2495,703	-3,700	13,690	6,250	4,614	21,290	1,555
p06	2495,878	2495,875	-0,300	0,090	0,810	1,166	1,360	4,844
p08	2489,546	2489,499	-4,700	22,090	12,250	4,531	20,530	1,355
p09	2487,758	2487,763	0,500	0,250	2,890	3,087	9,530	0,078
			<b>-7,20</b>	<b>44,62</b>	<b>35,98</b>	<b>20,20</b>	<b>81,65</b>	<b>13,63</b>



**Tabla 13:**

*Tabla de resultados del vuelo circular en el puente a 35 m de altura.*

Eje	Puntos de control u	EM (Error Medio) (cm)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error) (cm)	DEE (Desviación estándar de los errores) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo) (cm)
X	5	-0,483	1,764	1,858	2,800	0,200
Y	5	2,733	3,240	1,905	5,100	0,800
<b>Promedio (X, Y)</b>	5	3,367	3,689	1,651	5,104	1,166
Z	5	-1,200	2,727	2,683	4,700	0,300

<b>Precisión del Modelo (P=95%)</b>	$\epsilon_{RMCE r(x, y)}$	0,0612 m
	$\epsilon_{RMCE, Z}$	0.0534 m
	$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,012 ± 0,053 m

*Nota:* Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados (PV) que fueron posicionados con la ayuda de GPS Trimble R8s, mediante el servicio Ntrip. El presente informe no considera el punto p0 indicado en la Figura 39, debido a que los puntos generados en el sector son escasos al encontrarse en los límites del levantamiento.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 14

Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, para vuelo circular a 40 m de altura.

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	cm2
			en x (1)					en y (1)		
p03	781646,442	781646,49	4,80	23,04	35,52	9968564,722	9968564,742	2,00	4,00	3,24
p05	781670,129	781670,126	-0,30	0,09	0,74	9968592,859	9968592,816	-4,30	18,49	20,25
p06	781675,659	781675,63	-2,90	8,41	3,03	9968607,806	9968607,784	-2,20	4,84	5,76
p08	781636,244	781636,222	-2,20	4,84	1,08	9968593,555	9968593,588	3,30	10,89	9,61
p09	781682,151	781682,099	-5,20	27,04	16,32	9968564,615	9968564,637	2,20	4,84	4,00
			<b>-5,80</b>	<b>63,42</b>	<b>56,69</b>			<b>1,00</b>	<b>43,06</b>	<b>42,86</b>

Descripción	Z					X, Y			
	z	z	diferencia	diferencia al	(diferencia z	Ccal - Cobs	(Ccal -Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2	
	(observado)	(calculado)	z	cuadrado en z	- EM) ^2				
m	m	cm	(1)	cm2	cm2	cm	cm2	cm2	
p03	2496,153	2496,046	-10,700	114,490	49,000	5,200	27,040	0,419	
p05	2495,740	2495,759	1,900	3,610	31,360	4,310	18,580	0,059	
p06	2495,878	2495,943	6,500	42,250	104,040	3,640	13,250	0,833	
p08	2489,546	2489,503	-4,300	18,490	0,360	3,966	15,730	0,344	
p09	2487,758	2487,639	-11,900	141,610	67,240	5,646	31,880	1,196	
			<b>-18,50</b>	<b>320,45</b>	<b>252,00</b>	<b>43,08</b>	<b>22,76</b>	<b>106,48</b>	<b>2,85</b>

Tabla 15

Resultados fotogrametría en el puente, vuelo circular a 40 m de altura.

Eje	Puntos de control	EM (Error Medio) (cm)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error) (cm)	DEE (Desviación estándar de los errores) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo) (cm)
	u					
X	5	-1,160	3,561	3,765	5,200	0,300
Y	5	0,200	2,935	3,273	4,300	2,000
Promedio (X, Y)	5	4,553	4,615	0,844	5,646	3,640
Z	5	-3,700	8,006	7,937	11,900	1,900

<b>Precisión del Modelo (P=95%)</b>	$\epsilon_{RMCE\ r(x,y)}$	0,0795 m
	$\epsilon_{RMCE, Z}$	0,1569 m
	$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,037 ± 0,156 m

Nota: Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados, posicionados con la ayuda de GPS Trimble R8s, mediante la metodología Ntrip. Los puntos de verificación utilizados son los marcados en la Figura 39, con excepción de los puntos P00 y P02 debido a que la nube no genera cantidad de puntos suficientes al encontrarse en los límites fuera de la obra civil.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 16

*Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el puente, vuelo doble malla a 40 m de altura.*

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
	m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2
				en x (1)					en y (1)	
p00	781696,031	781696,017	-1,40	1,96	1,62	9968596,93	9968596,882	-4,80	23,04	14,01
p02	781616,938	781616,931	-0,70	0,49	0,33	9968547,14	9968547,109	-3,10	9,61	4,17
p03	781646,442	781646,491	4,90	24,01	25,29	9968564,722	9968564,708	-1,40	1,96	0,12
p05	781670,129	781670,129	0,00	0,00	0,02	9968592,859	9968592,859	0,00	0,00	1,12
p06	781675,659	781675,62	-3,90	15,21	14,22	9968607,806	9968607,803	-0,30	0,09	0,57
p08	781636,244	781636,225	-1,90	3,61	3,14	9968593,555	9968593,573	1,80	3,24	8,16
p09	781682,151	781682,172	2,10	4,41	4,97	9968564,615	9968564,619	0,40	0,16	2,12
			<b>-0,90</b>	<b>49,69</b>	<b>49,57</b>			<b>-7,40</b>	<b>38,10</b>	<b>30,28</b>

Descripción	Z			X, Y				
	z	z	diferencia	diferencia al	(diferencia z	Ccal - Cobs	(Ccal - Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2
	(observado)	(calculado)	z	cuadrado en z	- EM) ^2			
	m	m	cm	(1)	cm2	cm	cm2	cm2
p00	2494,996	2494,989	-0,700	0,490	26,010	5,000	25,000	1,817
p02	2495,803	2495,770	-3,300	10,890	6,250	3,178	10,100	0,225
p03	2496,153	2496,117	-3,600	12,960	4,840	5,096	25,970	2,085
p05	2495,740	2495,740	0,000	0,000	33,640	3,625	13,140	0,001
p06	2495,878	2495,932	5,400	29,160	125,440	3,912	15,300	0,067
p08	2489,546	2489,463	-8,300	68,890	6,250	2,617	6,850	1,071
p09	2487,758	2487,457	-30,100	906,010	590,490	2,138	4,570	2,294
			<b>-40,60</b>	<b>1028,40</b>	<b>792,92</b>	<b>25,57</b>	<b>100,93</b>	<b>7,56</b>

Tabla 17

Resultados fotogrametría en el puente, vuelo doble malla a 40 m de altura.

Eje	Puntos de control	EM (Error Medio) (cm)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error) (cm)	DEE (Desviación estándar de los errores) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo) (cm)
	u					
X	5	0,343	2,942	3,156	4,900	0,700
Y	5	-1,271	2,401	2,200	4,800	0,300
Promedio (X, Y)	5	3,652	3,797	1,122	5,096	2,138
Z	5	-5,743	12,122	11,530	30,100	0,400

<b>Precisión del Modelo (P=95%)</b>	$\epsilon_{RMCE\ r(x,y)}$	0,0654 m
	$\epsilon_{RMCE, Z}$	0,2376 m
	$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,057 ± 0,226 m

Nota: Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados posicionados con GPS R8s, mediante la metodología Ntrip.

La tabla 16 no considera el punto p9 indicado en la Figura 39, debido a que se encuentra en los límites del levantamiento, fuera de la estructura, por lo tanto, los puntos generados en el sector son escasos.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.

### **Centro de Investigaciones ESPE**

A continuación, se presentan las tablas de cálculos para los puntos considerados para la verificación en cada modelo.

Se validó el modelo 3D obtenido a partir de la nube de puntos y la malla de triangulación, comprobado a través de tablas de cálculo. Se determinó la precisión de los puntos de verificación obtenidos con el GPS Trimble R8s, y su ubicación homóloga en el modelo digital de elevación.

#### **Figura 40**

Ubicación de puntos de control y verificación en la zona edificio para restitución fotogramétrica.



*Nota:* La imagen muestra el modelo digital generado del procesamiento de las imágenes, sobre la que se muestra la ubicación de los puntos de control y verificación tomados en campo.

Tabla 18

Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el edificio, para vuelo circular a 37 m de altura.

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	
			en x (1)					en y (1)		
e01	784216,040	784216,129	8,90	79,21	95,76	9964742,043	9964742,002	-4,30	18,49	0,95
e05	784185,176	784185,205	1,30	1,69	4,78	9964825,072	9964825,109	4,91	24,11	67,85
e07	784214,248	784214,118	-8,50	72,25	57,98	9964689,516	9964689,639	6,10	37,21	88,87
e08	784220,312	784220,207	-2,30	5,29	2,00	9964711,782	9964711,786	-0,60	0,36	7,44
e09	784161,448	784161,375	-7,30	53,29	41,14	9964705,632	9964705,500	-13,20	174,24	97,47
e11	784140,472	784140,461	-1,10	1,21	0,05	9964798,109	9964798,083	-2,60	6,76	0,53
e12	784139,166	784139,194	2,80	7,84	13,58	9964692,099	9964691,963	-13,60	184,96	105,53
			<b>-6,20</b>	<b>220,78</b>	<b>215,29</b>			<b>-23,29</b>	<b>446,13</b>	<b>368,64</b>

Descripción	Z					X,Y,Z			
	z	z	diferencia	diferencia	(diferencia z -	Ccal - Cobs	(Ccal - Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2	
	(observado)	(calculado)	z	al	EM) ^2				
m	m	cm	cuadrado	cm2	cm	cm2	cm2		
			en z	(1)					
e01	2494,616	2494,636	2,000	4,000	75,186	9,799	96,020	41,313	
e05	2502,050	2502,040	-1,000	1,000	136,211	4,701	22,100	1,768	
e07	2506,977	2507,000	2,300	5,290	70,073	17,897	320,290	210,982	
e08	2506,936	2507,009	7,300	53,290	11,363	10,508	110,410	50,925	
e09	2506,995	2507,024	2,900	8,410	60,388	15,084	227,530	137,187	
e11	2488,330	2488,321	-0,900	0,810	133,887	2,823	7,970	0,301	
e12	2487,168	2487,278	11,000	121,000	0,108	13,885	192,800	110,540	
			<b>23,60</b>	<b>193,80</b>	<b>487,22</b>	<b>74,70</b>	<b>977,12</b>	<b>553,02</b>	

**Tabla 19**

*Resultados fotogrametría en el edificio, vuelo circular a 37 m de altura.*

Eje	Puntos de control	EM (Error Medio)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error)	DEE (Desviación estándar de los errores)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo)
	u	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
X	7	-2,471	7,830	8,026	13,000	1,100
Y	7	-2,443	8,847	9,185	13,600	0,400
<b>Promedio (X, Y)</b>	7	10,671	11,815	9,600	17,897	2,823
Z	7	3,371	5,262	9,011	11,000	0,900

<b>Precisión del Modelo (P=95%)</b>	$\epsilon_{RMCE\ r(x, y)}$	0,204 m
	$\epsilon_{RMCE, Z}$	0,103 m
	$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,034 ± 0,177 m

*Nota:* Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados posicionados con GPS Trimble R8s, mediante la metodología Ntrip.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.



Tabla 20

Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el edificio, para vuelo circular a 45 m de altura.

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	
			en x (1)					en y (1)		
					cm2					cm2
e01	784216,04	784216,116	7,60	57,76	35,49	9964742,043	9964742,055	1,20	1,44	0,00
e05	784185,176	784185,224	4,80	23,04	9,97	9964825,072	9964825,148	7,60	57,76	41,51
e07	784214,248	784214,255	0,70	0,49	0,89	9964689,516	9964689,482	-3,40	11,56	20,77
e08	784220,312	784220,353	4,10	16,81	6,04	9964711,782	9964711,75	-3,20	10,24	18,98
e09	784161,448	784161,427	-2,10	4,41	14,01	9964705,632	9964705,637	0,50	0,25	0,43
e11	784140,472	784140,47	-0,20	0,04	3,40	9964798,109	9964798,099	-1,00	1,00	4,65
e12	784139,166	784139,132	-3,40	11,56	25,43	9964692,099	9964692,163	6,40	40,96	27,49
			<b>11,50</b>	<b>114,11</b>	<b>95,22</b>			<b>8,10</b>	<b>123,21</b>	<b>113,84</b>

Descripción	Z					X,Y			
	z	z	diferencia	diferencia al	(diferencia z	Ccal - Cobs	(Ccal - Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2	
	(observado)	(calculado)	z	cuadrado en	- EM) ^2				
m	m	cm	z (1)	cm2	cm2	cm	cm2	cm2	
e01	2494,616	2494,682	6,600	43,560	2,215	7,694	59,200	31,295	
e05	2502,050	2502,047	-0,300	0,090	29,285	8,989	80,800	47,457	
e07	2506,977	2507,046	6,900	47,610	3,199	3,471	12,050	1,880	
e08	2506,936	2507,000	6,400	40,960	1,660	5,201	27,050	9,616	
e09	2506,995	2507,017	2,200	4,840	8,477	2,159	4,660	0,003	
e11	2488,330	2488,273	-5,700	32,490	116,890	1,020	1,040	1,167	
e12	2487,168	2487,154	-1,400	1,960	42,400	7,247	52,520	26,492	
			<b>14,70</b>	<b>171,51</b>	<b>204,13</b>	<b>35,78</b>	<b>237,32</b>	<b>117,91</b>	

**Tabla 21**

Resultados fotogrametría en el edificio, vuelo circular a 45 m de altura.

Eje	Puntos de control	EM (Error Medio)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error)	DEE (Desviación estándar de los errores)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo)
	u	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
X	7	1,643	4,038	3,984	7,600	0,200
Y	7	1,157	4,195	4,356	7,600	0,500
Promedio (X, Y)	7	5,112	5,823	4,433	8,989	1,020
Z	7	2,100	4,950	5,833	6,900	0,300

**Precisión del Modelo (P=95%)**

$\epsilon_{RMCE\ r(x,y)}$	0,100 m
$\epsilon_{RMCE, Z}$	0,097 m
$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,021 ± 0,114 m

*Nota:* Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados posicionados con GPS Trimble R8s, mediante la metodología Ntrip. Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 22

Cálculo estadístico de puntos georreferenciados en el edificio, para vuelo doble malla a 45 m de altura.

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	cm2
			en x (1)					en y (1)		
e01	784216,04	784216,022	-1,80	3,24	4,35	9964742,043	9964742,039	-0,40	0,16	0,71
e05	784185,176	784185,217	4,10	16,81	14,55	9964825,072	9964825,074	0,20	0,04	2,08
e07	784214,248	784214,154	-9,40	88,36	93,81	9964689,516	9964689,524	0,80	0,64	4,17
e08	784220,312	784220,346	3,40	11,56	9,70	9964711,782	9964711,725	-5,70	32,49	19,87
e09	784161,448	784161,476	2,80	7,84	6,32	9964705,632	9964705,581	-5,10	26,01	14,88
e11	784140,472	784140,499	2,70	7,29	5,83	9964798,109	9964798,065	-4,40	19,36	9,97
e12	784139,166	784139,168	0,20	0,04	0,01	9964692,099	9964692,158	5,90	34,81	51,02
			<b>2,00</b>	<b>135,14</b>	<b>134,57</b>			<b>-8,70</b>	<b>113,51</b>	<b>102,70</b>

Descripción	Z					X, Y		
	z	z	diferencia	diferencia al	(diferencia z	Ccal - Cobs	(Ccal -Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)-EM]^2
	(observado)	(calculado)	z	cuadrado en z	- EM) ^2	cm	cm2	cm2
m	m	cm	(1)	cm2	cm	cm2	cm2	
e01	2494,616	2494,526	-9,000	81,000	211,925	1,844	3,400	0,325
e05	2502,050	2502,176	12,600	158,760	49,595	4,105	16,850	2,858
e07	2506,977	2507,236	25,900	670,810	413,811	9,434	89,000	49,276
e08	2506,936	2507,333	39,700	1576,090	1165,699	6,637	44,050	17,831
e09	2506,995	2507,167	17,200	295,840	135,544	5,818	33,850	11,586
e11	2488,330	2488,026	-30,400	924,160	1292,953	5,162	26,650	7,552
e12	2487,168	2486,777	-39,100	1528,810	1994,306	5,903	34,850	12,174
			<b>16,90</b>	<b>5235,47</b>	<b>5263,83</b>	<b>38,90</b>	<b>248,65</b>	<b>101,60</b>

Tabla 23

Resultados fotogrametría en el edificio, vuelo doble malla a 45 m de altura.

Eje	Puntos de control	EM (Error Medio)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error)	DEE (Desviación estándar de los errores)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo)
	u	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
X	7	0,286	4,394	4,736	9,400	0,200
Y	7	-1,243	4,027	4,137	5,900	0,200
<b>Promedio (X, Y)</b>	7	5,558	5,960	4,115	9,434	1,844
Z	7	2,414	27,348	29,619	39,700	9,000

<b>Precisión del Modelo (P=95%)</b>	$\epsilon$ RMCE r (x,y)	0,103 m
	$\epsilon$ RMCE, Z	0,5360 m
	$\epsilon$ $\sigma$ , Z	-0,024 $\pm$ 0,581 m

Nota: Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados posicionados con GPS TrimbleR8s, mediante la metodología Ntrip.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 1.

**Tabla 24**

*Resultados de errores estadísticos del puente Alfredo Gangotena.*

Eje	Parámetros	Vuelo circular (cm)	Vuelo circular 2 (cm)	Doble malla (cm)
<b>X</b>	<b>EM</b>	-0,483	-1,160	0,343
	<b>RCME</b>	1,764	3,561	2,942
	<b>DEE</b>	1,858	3,765	3,156
	<b>E<sub>max</sub></b>	2,800	5,200	4,900
	<b>E<sub>min</sub></b>	0,200	0,300	0,700
<b>Y</b>	<b>EM</b>	2,733	0,200	-1,271
	<b>RCME</b>	3,240	2,935	2,401
	<b>DEE</b>	1,905	3,273	2,200
	<b>E<sub>max</sub></b>	5,100	4,300	4,800
	<b>E<sub>min</sub></b>	0,800	2,000	0,300
<b>Planimetría (X, Y)</b>	<b>EM</b>	3,367	-3,700	-5,743
	<b>RCME</b>	3,689	8,006	12,122
	<b>DEE</b>	1,651	7,937	11,530
	<b>E<sub>max</sub></b>	5,104	11,900	30,100
	<b>E<sub>min</sub></b>	1,166	3,640	2,138
<b>Z</b>	<b>EM</b>	-1,200	4,553	3,652
	<b>RCME</b>	2,727	4,615	3,797
	<b>DEE</b>	2,683	0,844	1,122
	<b>E<sub>max</sub></b>	4,700	5,646	5,096
	<b>E<sub>min</sub></b>	0,300	1,900	0,400

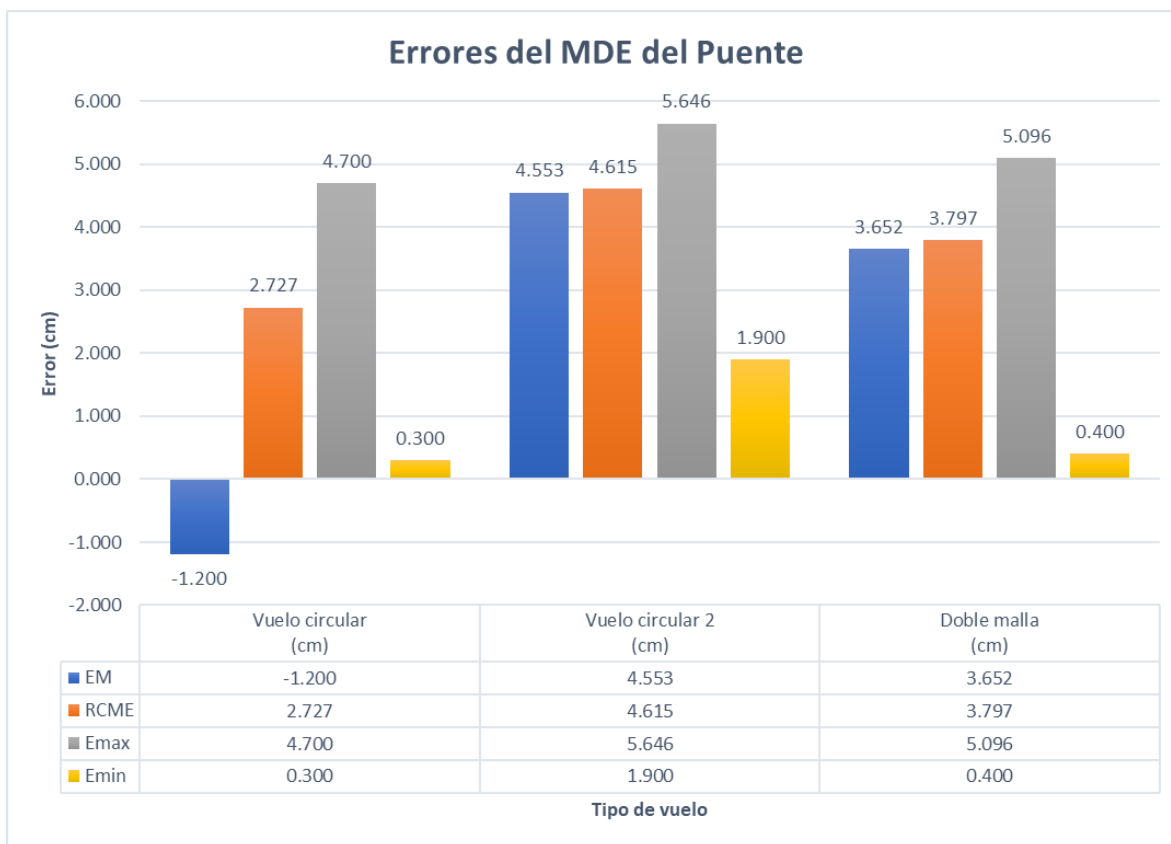
*Nota:* La tabla indica los errores presentados en los distintos tipos de vuelos realizados para el puente ubicado sobre la calle Alfredo Gangotena.

Se considerará al error medio cuadrático como parámetro de evaluación del modelo, ya que el valor considera la dispersión de datos y el desplazamiento que existe de los valores verdaderos. Por lo tanto, el RMSE de mayor precisión se puede considerar al vuelo circular a 35 metros.

A continuación, se presenta en la Figura 41, los errores presentes en los modelos digitales de elevación para los tres tipos de vuelo.

**Figura 41**

*Errores estadísticos del modelo digital del terreno en elevación del puente*



*Nota:* La figura muestra los errores presentes en elevación para los modelos realizados en el puente Alfredo Gangotena.

La raíz media cuadrática más baja fue la realizada mediante el vuelo circular a 35 metros, por ende, la precisión del mismo modelo es de más alta calidad.

**Tabla 25**

*Resultados de errores estadísticos del edificio de Investigaciones.*

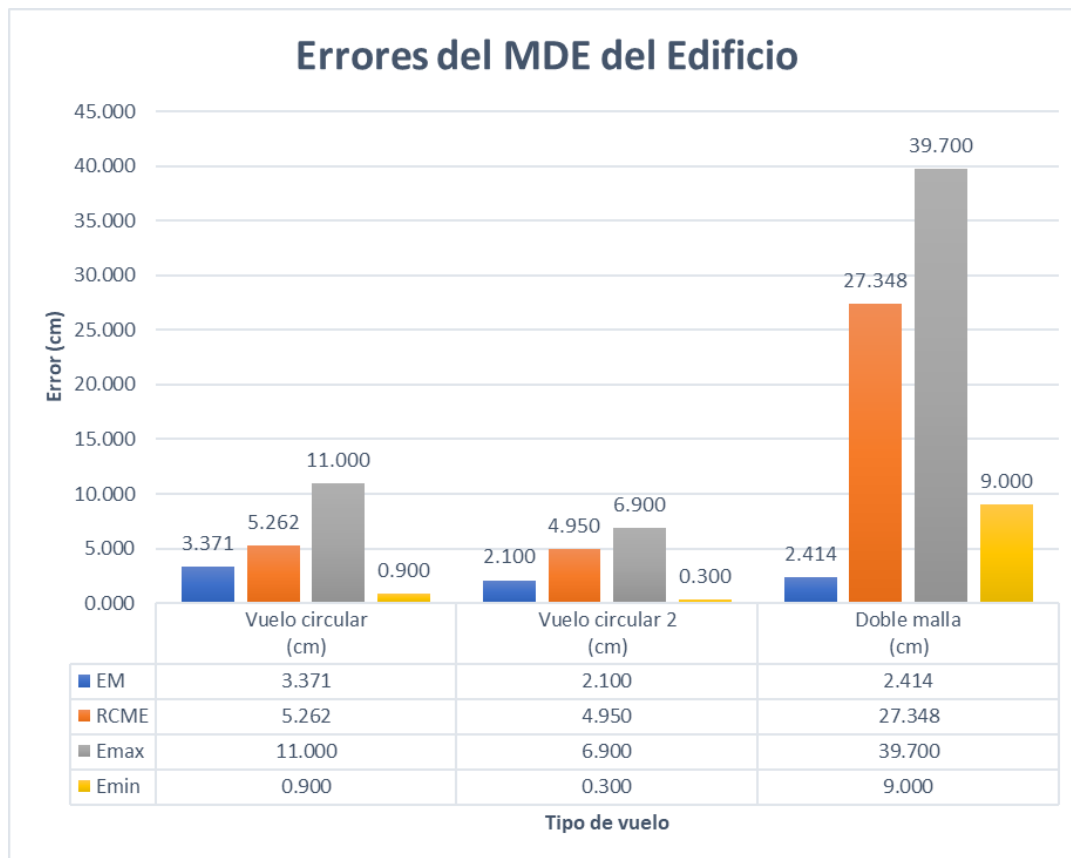
Eje	Parámetros	Vuelo circular (cm)	Vuelo circular 2 (cm)	Doble malla (cm)
<b>X</b>	<b>EM</b>	-2,471	1,643	0,286
	<b>RCME</b>	7,830	4,038	4,394
	<b>DEE</b>	8,026	3,984	4,736
	<b>E<sub>max</sub></b>	13,000	7,600	9,400
	<b>E<sub>min</sub></b>	1,100	0,200	0,200
<b>Y</b>	<b>EM</b>	-2,443	1,157	-1,243
	<b>RCME</b>	8,847	4,195	4,027
	<b>DEE</b>	9,185	4,356	4,137
	<b>E<sub>max</sub></b>	13,600	7,600	5,900
	<b>E<sub>min</sub></b>	0,400	0,500	0,200
<b>Planimetría (X, Y)</b>	<b>EM</b>	10,671	5,112	5,558
	<b>RCME</b>	11,815	5,823	5,960
	<b>DEE</b>	9,600	4,433	4,115
	<b>E<sub>max</sub></b>	17,897	8,989	9,434
	<b>E<sub>min</sub></b>	2,823	1,020	1,844
<b>Z</b>	<b>EM</b>	3,371	2,100	2,414
	<b>RCME</b>	5,262	4,950	27,348
	<b>DEE</b>	9,011	5,833	29,619
	<b>E<sub>max</sub></b>	11,000	6,900	39,700
	<b>E<sub>min</sub></b>	0,900	0,300	9,000

*Nota:* La tabla indica los errores presentados en los distintos tipos de vuelos realizados para el edificio del nuevo centro de Investigaciones ESPE.

El parámetro usado para evaluar los modelos fue el error medio cuadrático, el valor considera la dispersión de datos y el desplazamiento que existe de los valores verdaderos. La representación que mejor adaptó el terreno georreferenciado alcanzó fue el vuelo circular a 45 metros de altura.

**Figura 42**

*Errores estadísticos modelo digital del terreno en elevación del edificio.*



*Nota:* La figura muestra los errores presentes en elevación para los modelos realizados en el edificio del nuevo centro de Investigaciones y Posgrados ESPE.

La raíz media cuadrática más baja fue la realizada mediante el vuelo circular a 45 metros, por ende, la precisión del mismo modelo es de más alta calidad.

Además, se evaluará el modelo del edificio de investigaciones al agregar los puntos obtenidos con estación total en diferentes sectores del edificio de investigaciones, específicamente en las fachadas de la edificación.

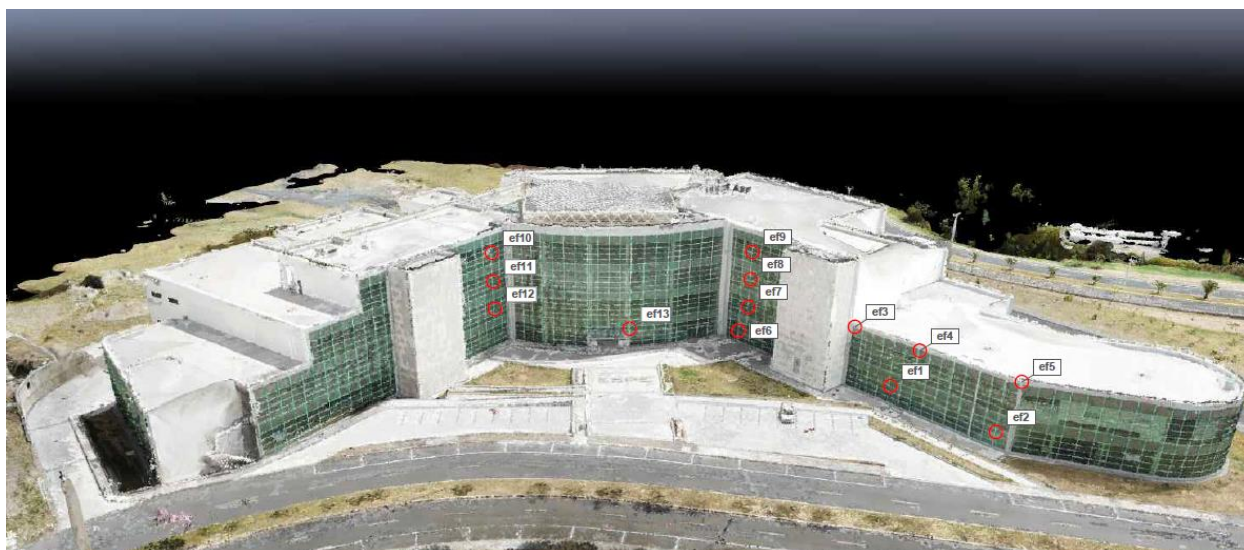


Se volverá a determinar la precisión al considerar todo el conjunto de puntos (GPS con servicio Ntrip, estación total) en el MDE de vuelo circular a 45 metros. El resultado global a obtener considerará el error para el modelo digital de elevación del edificio.

Los puntos a corroborar son los mostrados en la Figura 43, 44, 45. De esta manera, se verificó la precisión de los puntos en sectores más específicos de la obra civil.

### Figura 43

*Ubicación puntos de verificación frente del edificio.*



*Nota:* La imagen muestra la fachada frontal del edificio de investigaciones de la Universidad de las Fuerzas ESPE (entrada principal), con las ubicaciones de los puntos a verificar. La imagen presentada es producto del modelo fotogramétrico.

**Figura 44**

*Ubicación puntos de verificación del edificio, sector garita.*



*Nota:* La imagen muestra la fachada lateral del edificio, sector ingreso sur de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con las ubicaciones de los puntos a verificar. La imagen presentada es el resultado del modelo de elevación generado.

**Figura 45**

*Ubicación puntos de verificación del edificio, sector posterior.*



*Nota:* La imagen muestra la fachada lateral del edificio, zona que colinda con los terrenos de la Fuerzas Armadas ESPE, con las ubicaciones de los puntos a verificar. La imagen es obtenida del modelo digital de elevación.

Tabla 26

*Cálculo estadístico de puntos georreferenciados con estación total en el edificio.*

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cm2	cm2	m	m	cm	cm2	cm2	
ef0	784182,925	784182,926	0,07	0,00	16,10	9964787,780	9964787,755	-2,54	6,45	0,15
ef1	784185,606	784185,585	-2,09	4,37	38,11	9964792,832	9964792,819	-1,27	1,61	2,76
ef2	784193,637	784193,585	-5,18	26,83	85,80	9964807,958	9964807,942	-1,57	2,46	1,85
ef3	784182,068	784182,042	-2,60	6,76	44,66	9964786,147	9964786,107	-3,95	15,60	1,04
ef4	784187,442	784187,400	-4,18	17,47	68,28	9964796,263	9964796,273	1,02	1,04	15,61
ef5	784194,732	784194,563	-16,87	284,60	439,03	9964809,996	9964809,827	-16,93	286,62	195,96
ef6	784171,396	784171,543	14,74	217,27	113,57	9964765,965	9964765,853	-11,21	125,66	68,54
ef7	784172,237	784172,339	10,19	103,84	37,29	9964767,590	9964767,396	-19,44	377,91	272,53
ef8	784172,237	784172,433	19,59	383,77	240,47	9964767,590	9964767,404	-18,64	347,45	246,76
ef9	784172,240	784172,374	13,39	179,29	86,62	9964767,582	9964767,415	-16,67	277,89	188,75
ef10	784190,155	784190,111	-4,37	19,10	71,45	9964728,171	9964728,062	-10,89	118,59	63,34
ef11	784190,166	784190,134	-3,22	10,37	53,33	9964728,168	9964727,909	-25,85	668,22	525,26
ef12	784190,145	784190,130	-1,45	2,10	30,61	9964728,174	9964727,930	-24,41	595,85	461,33
ef13	784181,050	784181,140	8,98	80,64	23,98	9964749,494	9964749,498	0,45	0,20	11,43
eg0	784151,928	784151,988	5,99	35,88	3,64	9964792,340	9964792,329	-1,10	1,21	3,35
eg1	784141,429	784141,601	17,17	294,81	171,27	9964772,697	9964772,698	0,13	0,02	9,37
eg2	784133,734	784133,902	16,77	281,23	160,96	9964758,268	9964758,201	-6,67	44,49	13,98
eg3	784133,730	784133,932	20,21	408,44	260,08	9964758,251	9964758,152	-9,88	97,61	48,28

Descripción	X					Y				
	x	x	diferencia	diferencia	(diferencia	y	y	diferencia	diferencia	(diferencia
	(observado)	(calculado)	x	al	x - EM) ^2	(observado)	(calculado)	y	al	y - EM) ^2
m	m	cm	cuadrado	cm2	m	m	cm	cuadrado	cm2	
			en x (1)					en y (1)		
eg4	784141,449	784141,602	15,34	235,32	126,72	9964772,735	9964772,745	0,99	0,98	15,38
eg5	784149,056	784149,206	14,99	224,70	118,96	9964787,019	9964787,036	1,72	2,96	21,64
eg6	784158,073	784158,120	4,72	22,28	0,41	9964803,970	9964803,973	0,35	0,12	10,77
eg8	784174,996	784175,012	1,59	2,53	6,22	9964816,526	9964816,658	13,21	174,50	260,54
eg9	784174,943	784175,007	6,37	40,58	5,23	9964818,577	9964818,619	4,24	17,98	51,43
lt2	784158,381	784158,410	2,91	8,47	1,38	9964691,223	9964691,238	1,54	2,37	19,99
lt5	784158,393	784158,417	2,43	5,90	2,73	9964691,217	9964691,232	1,48	2,19	19,46
lt8	784158,384	784158,389	0,52	0,27	12,70	9964691,206	9964691,202	-0,42	0,18	6,31
lt9	784161,413	784161,427	1,41	1,99	7,15	9964690,505	9964690,625	12,03	144,72	223,84
lt10	784170,277	784170,315	3,85	14,82	0,05	9964688,537	9964688,727	19,04	362,52	482,74
lt13	784217,710	784217,652	-5,78	33,41	97,28	9964680,169	9964680,185	1,61	2,59	20,62
e01	784216,040	784216,116	7,60	57,76	12,37	9964742,043	9964742,055	1,20	1,44	17,07
e05	784185,176	784185,224	4,80	23,04	0,51	9964825,072	9964825,148	7,60	57,76	110,91
e07	784214,248	784214,255	0,70	0,49	11,45	9964689,516	9964689,482	-3,40	11,56	0,22
e08	784220,312	784220,353	4,10	16,81	0,00	9964711,782	9964711,750	-3,20	10,24	0,07
e09	784161,448	784161,427	-2,10	4,41	38,23	9964705,632	9964705,637	0,50	0,25	11,77
e11	784140,472	784140,470	-0,20	0,04	18,34	9964798,109	9964798,099	-1,00	1,00	3,73
e12	784139,166	784139,132	-3,40	11,56	56,00	9964692,099	9964692,163	6,40	40,96	87,07
			<b>146,99</b>	<b>3061,14</b>	<b>2460,98</b>			<b>-105,53</b>	<b>3803,23</b>	<b>3493,89</b>

Descripción	Z					X, Y		
	z (observado)	z (calculado)	diferencia z	diferencia al cuadrado en z (1)	(diferencia z - EM) ^2	Ccal - Cobs	(Ccal -Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)- EM]^2
	m	m	cm	cm2	cm2	cm	cm2	cm2
ef0	2494,890	2494,881	-0,900	0,810	0,063	2,541	6,456	75,137
ef1	2494,889	2494,878	-1,100	1,210	0,202	2,446	5,981	76,799
ef2	2494,877	2494,868	-0,900	0,810	0,063	5,413	29,297	33,599
ef3	2502,141	2502,139	-0,200	0,040	0,203	4,729	22,362	41,993
ef4	2502,134	2502,125	-0,900	0,810	0,063	4,303	18,513	47,699
ef5	2502,711	2502,683	-2,800	7,840	4,622	23,900	571,222	161,064
ef6	2494,062	2494,056	-0,600	0,360	0,003	18,518	342,932	53,426
ef7	2498,958	2498,968	1,000	1,000	2,722	21,949	481,750	115,340
ef8	2503,889	2503,902	1,300	1,690	3,802	27,041	731,218	250,649
ef9	2508,817	2508,818	0,100	0,010	0,563	21,382	457,181	103,483
ef10	2508,833	2508,838	0,500	0,250	1,323	11,734	137,689	0,276
ef11	2503,907	2503,909	0,200	0,040	0,722	26,050	678,591	220,245
ef12	2498,987	2498,959	-2,800	7,840	4,623	24,453	597,951	175,401
ef13	2495,790	2495,790	0,000	0,000	0,422	8,991	80,843	4,919
eg0	2494,042	2494,015	-2,700	7,290	4,203	6,090	37,090	26,204
eg1	2494,032	2494,022	-1,000	1,000	0,123	17,170	294,826	35,538
eg2	2494,053	2494,052	-0,100	0,010	0,303	18,048	325,722	46,767
eg3	2503,859	2503,833	-2,600	6,760	3,802	22,496	506,058	127,388

Descripción	Z					X, Y		
	z (observado)	z (calculado)	diferencia z	diferencia al cuadrado en z (1)	(diferencia z - EM) ^2	Ccal - Cobs	(Ccal -Cobs) ^2	[(Ccal - Cobs)- EM]^2
	m	m	cm	cm2	cm2	cm	cm2	cm2
eg4	2503,889	2503,900	1,100	1,210	3,062	15,372	236,296	17,329
eg5	2503,910	2503,926	1,600	2,560	5,063	15,088	227,659	15,048
eg6	2502,089	2502,080	-0,900	0,810	0,063	4,733	22,401	41,941
eg8	2498,941	2498,970	2,900	8,410	12,602	13,305	177,032	4,394
eg9	2493,997	2493,975	-2,200	4,840	2,402	7,652	58,555	12,653
lt2	2493,398	2493,388	-1,000	1,000	0,123	3,292	10,840	62,675
lt5	2498,365	2498,364	-0,100	0,010	0,303	2,845	8,095	69,955
lt8	2503,305	2503,295	-1,000	1,000	0,122	0,668	0,447	111,106
lt9	2507,754	2507,694	-6,000	36,000	28,622	12,112	146,709	0,816
lt10	2507,839	2507,730	-10,900	118,810	105,062	19,425	377,344	67,506
lt13	2507,725	2507,644	-8,100	65,610	55,503	6,000	36,001	27,135
e01	2494,616	2494,682	6,600	43,560	52,562	7,694	59,200	12,355
e05	2502,050	2502,047	-0,300	0,090	0,122	8,989	80,800	4,930
e07	2506,977	2507,046	6,900	47,610	57,002	3,471	12,050	59,874
e08	2506,936	2507,000	6,400	40,960	49,702	5,201	27,050	36,098
e09	2506,995	2507,017	2,200	4,840	8,122	2,159	4,660	81,910
e11	2488,330	2488,273	-5,700	32,490	25,502	1,020	1,040	103,822
e12	2487,168	2487,154	-1,400	1,960	0,563	7,247	52,520	15,698
			<b>-23,400</b>		<b>434,330</b>	<b>403,529</b>	<b>6864,379</b>	<b>2341,172</b>

**Tabla 27**

Resultados fotogrametría del edificio, vuelo circular a 37 m de altura.

Eje	Puntos de control u	EM (Error Medio) (cm)	RCME (Raíz del cuadrado medio del error) (cm)	DEE (Desviación estándar de los errores) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto máximo) (cm)	E <sub>max</sub> (Error absoluto mínimo) (cm)
X	7	4,083	9,221	8,385	20,210	0,070
Y	7	-2,931	10,278	9,991	25,850	0,130
Promedio (X, Y)	7	11,209	13,809	8,179	27,041	0,668
Z	7	-0,650	3,534	3,523	10,900	0,000

**Precisión del Modelo (P=95%)**

$\epsilon_{RMCE\ r(x,y)}$	0,138 m
$\epsilon_{RMCE, Z}$	0,0693 m
$\epsilon_{\sigma, Z}$	-0,006 ± 0,069 m

*Nota:* Se realizó la comparación de los puntos georreferenciados, posicionados con GPS Trimble R8s y estación total M3.

Las fotografías y coordenadas de los puntos posicionados para la verificación y georreferenciación del modelo se encuentran en el Anexo 2.

Es importante resaltar que la precisión calculada para el modelo con 36 puntos de verificación es mucho menor, a la determinada con 7 puntos de verificación, esto, debido a que la cantidad de datos muestreados es mayor y los errores se pueden compensar, haciendo que la dispersión disminuya y la información sea más sólida al contar con una cantidad

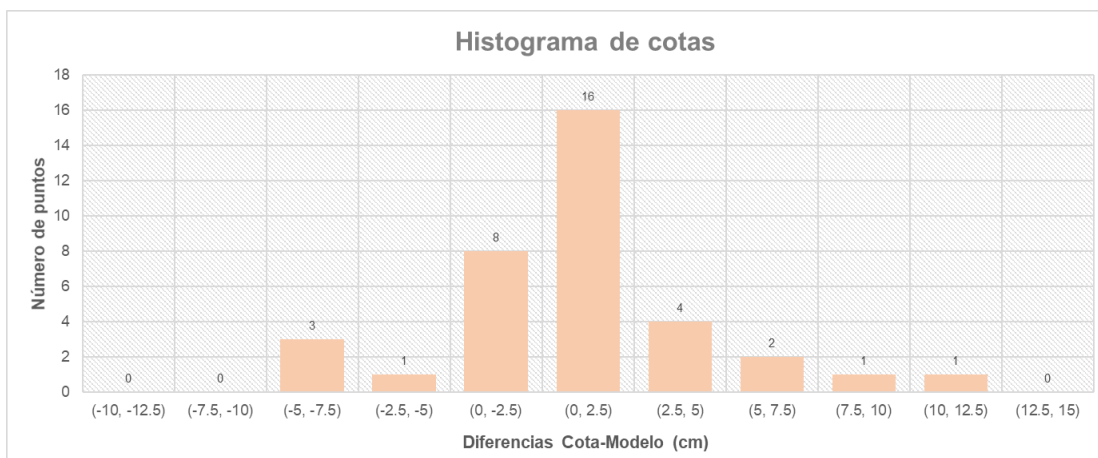


de datos considerable.

Se presenta el histograma con los resultados de los puntos obtenidos para los rangos del error obtenido con los 36 puntos del edificio del nuevo centro de investigaciones y posgrados ESPE.

### Figura 46

Histograma de diferencias de puntos comparados



*Nota:* El gráfico muestra la cantidad de puntos que se encuentran en los distintos rangos, establecidos cada 2,5 cm. Se reconoce que la mayoría de las diferencias de elevación se encuentra entre 0 y 2,5 cm.

Además, se debe recordar, que construido al modelo en 3D, se le debe realizar comprobaciones de medidas en algún objeto que sea reconocible en el terreno y permita dimensionarlo con algún instrumento. Dichas comprobaciones tanto para el puente como para el edificio, fueron comprobadas y presentadas en el Anexos 3 y 4, a partir de mediciones con cinta métrica en campo.

Por último, se presenta la Tabla 28 y 29, con las precisiones obtenidas para los distintos modelos de las estructuras analizadas.



**Tabla 28**

*Cálculo de precisiones de modelo 3D del puente Alfredo Gangotena.*

	<b>Vuelo circular (cm)</b>	<b>Vuelo circular 2 (cm)</b>	<b>Doble malla (cm)</b>
$\epsilon_{RMSEr}$	6,124	7,950	6,539
$\epsilon_{RMSEz}$	5,345	15,69	23,759

*Nota:* La tabla muestra las precisiones de los distintos tipos de vuelos realizados para el puente Alfredo Gangotena.

Las precisiones calculadas para los modelos del puente Alfredo Gangotena, están por debajo del error planimétrico para escala 1:500 (0,125 m) y 1:1000 (0,25 m). Así también, el error vertical de los modelos es inferior del valor permitido para escala 1:500 (0,17m) y 1:1000 (0,33 m). Escalas utilizadas para actividades de diseño y construcción de estructuras.

**Tabla 29**

*Cálculo de precisiones de modelo 3D edificio de investigaciones ESPE.*

	<b>Vuelo circular (cm)</b>	<b>Vuelo circular 2 (cm)</b>	<b>Doble malla (cm)</b>
$\epsilon_{RMSEr}$	20,411	10,076	10,306
$\epsilon_{RMSEz}$	10,313	9,702	53,60

*Nota:* La tabla muestra las precisiones de los distintos tipos de vuelos realizados para el edificio del nuevo centro de Investigaciones ESPE.

Las precisiones calculadas para los modelos del edificio de investigaciones ESPE, superan los límites admisibles, a excepción del vuelo circular a 45 metros, que cuenta valores planimétricos y verticales por debajo del máximo permitido para escala 1:500 y 1:1000. Escalas utilizadas para actividades de diseño y construcción de estructuras.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

- El presente estudio recopiló la información necesaria, junto con las consideraciones y configuraciones para obtener un modelo digital de elevación de una estructura civil a partir de nube de puntos obtenida con UAV.
- Se obtuvo las fotografías mediante UAV para la elaboración del modelo digital de elevación, tanto para el puente Alfredo Gangotena, como para el edificio de investigaciones ESPE, siendo el último, uno de los que mayor dificultad presentó, debido a las superficies llanas en la parte superior del edificio, que, combinadas a condiciones climáticas soleadas, hacen que estas zonas no sean reconocidas por la cámara debido a la reflexión de la luz.
- Los puntos de control del puente Alfredo Gangotena y el edificio de investigaciones ESPE, fueron obtenidos meticulosamente, manteniendo la antena receptora Trimble R8s, lo más aplomada posible, y manteniendo señales satelitales en todo momento, al ser los levantamientos convencionales los principales errores cometidos dentro de los estudios fotogramétricos.
- El levantamiento mediante fotogrametría permite obtener información más detallada del sector en análisis, mejorando la representación tanto del terreno como de la estructura, consiguiendo un insumo que puede ser utilizado dentro de las aplicaciones de ingeniería civil, al permitir realizar mediciones y modificaciones de la infraestructura al modelar sobre la nube de puntos y malla de triángulos.
- Los modelos que obtuvieron mayores precisiones fueron el vuelo circular a 35 m para el puente Alfredo Gangotena, y el vuelo circular a 45 m en el caso del edificio de investigaciones y Posgrados ESPE, ya que las fotografías obtenidas en la operación

consideran de manera adecuada la estructura ajustándola desde diferentes ángulos y considerando la estructura en su totalidad, a diferencia del vuelo doble malla, que si bien cuenta con un mayor número de imágenes y solapamiento al momento de obtener información, este, no reconoce de manera adecuada las parte inferiores del puente, ni superiores de la edificación.

- Los valores obtenidos en el reporte de calidad del UAV de los modelos digitales mediante UAV, cuentan con precisiones de elevación de  $\varepsilon_{\sigma,z} = 0,012 \pm 0,053 \text{ m}$  en el puente Alfredo Gangotena, y  $\varepsilon_{\sigma,z} = 0,006 \pm 0,069 \text{ m}$  en el caso del edificio del nuevo Centro de Investigaciones y Posgrados ESPE, considerando un intervalo de confianza del 95% en los dos casos.
- Los modelos 3D de obras civiles obtenidos mediante UAV, al igual que MDS, MDT y ortofotografía, son productos con alta calidad que permiten representar de manera adecuada el sitio en análisis, convirtiéndolos en insumos de alto valor para el uso dentro de la ingeniería civil, que puede ser usado en la fiscalización de obras al ser completamente métrico, de fácil visualización y alcance en zonas de difícil acceso en las que no se puede tener control.
- El modelo 3D es preciso en la determinación de cantidades, con la consideración de que las mediciones dependerán del cuidado con las que se realice. Permitiendo calcular distancias, áreas y volúmenes, siendo las dos primeras opciones extremadamente útiles, mientras que, para la obtención de volúmenes se deberá usar otros medios, debido a la presentación de resultados en intervalos con rangos demasiado altos que no indiquen un valor específico.

## Recomendaciones

- Planificar la ruta vuelo, considerando que la misma abarque toda la zona delimitada previamente, de esta forma, se obtendrá información de todos los elementos dentro de la estructura en análisis.
- Escoger los parámetros de vuelo como: la altitud, traslape, ángulo de la cámara, considerando las características del sector donde se realizará el levantamiento fotogramétrico, ya que los objetos existentes pueden ser limitantes al momento de la operación.
- Considerar el uso de más de un vuelo circular para la elaboración de un modelo 3D fotogramétrico utilizando diferentes alturas, de ser posible el caso, se ajustará de manera adecuada las zonas bajas y altas de la estructura, con información suficiente para un procesamiento adecuado. Además, se podría implementar el uso de fotografías obtenidas con vuelos libres, que complementen información en sectores que por cuestiones ambientales no puedan ser cubiertos con las misiones propuestas en el estudio.
- En el caso de edificios, donde se vaya a utilizar paneles para la toma de puntos de control, se debe tratar que estos se encuentren sujetos a la superficie, colocando objetos como: piedras, bloques o cualquier elemento de peso considerable que evite que la ubicación del punto de control se mueva, por las corrientes de viento.
- Ampliar el estudio realizando diferentes modelos de elevación en horas distintas del día, considerando variaciones climáticas, y con un número mayor de repeticiones del levantamiento fotogramétrico con configuraciones similares, para de esa manera concretar para corroborar, lo ya comprobado en el presente estudio.

## Referencias

- Abd Elbasit, M. A. M. (2009). Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification. *Okt 2005 Abrufbar Uber Httpwww Tldp OrgLDPabsabsguide Pdf Zugriff 1112 2005, 2274*(November 2008), 2267–2274. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Balasubramanian, A. (2017). Bridges and their types. *University of Mysore*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18109.46566>
- Bone, E., & Bolkcom, C. (2003). Report for Congress Unmanned Aerial Vehicles : *Congressional Research Service*, 1–52.
- Briceño, A., I Rubí, L. M., Cioce, V., Royero, G., Bacaicoa, L., Wildermann, E., Hoyer, M., & Barrios, M. (2009). Mediciones GPS NTRIP: Una nueva alternativa para el posicionamiento preciso en Venezuela. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 32(3), 200–209.
- Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., & Lacan, P. (2020). Is UAV-SfM surveying ready to replace traditional surveying techniques? *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), 4818–4835. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1727049>
- Chandler, J. H., Buffin-Bélanger, T., Rice, S., Reid, I., & Graham, D. J. (2003). The accuracy of a river bed moulding/casting system and the effectiveness of a low-cost digital camera for recording river bed fabric. *Photogrammetric Record*, 18(103), 209–223. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.t01-1-00008>
- Contraloria General del Estado. (2009). Normas De Control Interno De La Contraloria General Del Estado. *Registro Oficial*, 87, 1–79. [http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic5\\_ecu\\_ane\\_cge\\_12\\_nor\\_con\\_int\\_400\\_cge.pdf](http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic5_ecu_ane_cge_12_nor_con_int_400_cge.pdf)
- De Reu, J. (2018). Image-Based 3D Modeling. *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, 21(September), 1–4. <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0316>
- Deebak, B. D., & Al-Turjman, F. (2020). Aerial and underwater drone communication: potentials and vulnerabilities. In *Drones in Smart-Cities*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819972-5.00001-x>
- Delgado, J. (2013, April 7). *Edificio (Definición, Concepto)*.

<https://edukavital.blogspot.com/2013/04/edificio.html>

Dirección General De Aviación Civil. (2020). *Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs)*. 811, 1–2.

Dji. (2016). *Mavic Pro*. <https://www.dji.com/mavic>

Green, S., Bevan, A., & Shapland, M. (2014). A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. *Journal of Archaeological Science*, 46(1), 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.030>

Guidi, G., Beraldin, J. A., Ciofi, S., & Atzeni, C. (2003). Fusion of range camera and photogrammetry: A systematic procedure for improving 3-D models metric accuracy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 33(4), 667–676. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.814282>

Ibáñez Martínez, E., Gili Ripoll, J. A., & Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, C. i G. (2008). Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado aplicación a la marisma del Parque Nacional de Doñana. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://www.tesisenred.net/handle/10803/6260>

IGM. (2021). *NTRIP IGM*.

[http://www.geoportaligm.gob.ec/ntrip/public/estaciones/listado\\_estaciones](http://www.geoportaligm.gob.ec/ntrip/public/estaciones/listado_estaciones)

ISO 19115-2:2009. (2010). *INTERNATIONAL STANDARD iTeh STANDARD iTeh STANDARD PREVIEW*. 2010, 3–6.

Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., Flores-Velázquez, J., Marcial-Pablo, M. de J., & Robles-Rubio, B. D. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85–100. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.007>

Jin, S., Cardellach, E., & Xie, F. (2014). *Introduction to GNSS*. 3–16.

[https://doi.org/10.1007/978-94-007-7482-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7482-7_1)

López, S. (1996). *topografía Universidad politecnica de madrid.pdf* (p. 474). Mundi-Prensa.

Márquez, A. (2016). *NTRIP, Herramienta Indispensable para la Cartografía y el Catastro*.

Merry, C. (2007). GPS NTRIP - the future of differential GPS ? *PositionIT*, 53–55.

- Mosbrucker, A. R., Major, J. J., Spicer, K. R., & Pitlick, J. (2017). Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(6), 969–986. <https://doi.org/10.1002/esp.4066>
- NSSDA. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy. *National Spatial Data Infrastructure*, 28. <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
- Peña, S. (2019). *TESIS DOCTORAL Y ARQUITECTÓNICO*. 224.
- Pipinato, A. (2016). The history, aesthetics, and design of bridges. In *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800058-8.00001-3>
- Pix4D. (2021). *Types of mission / Which type of mission to choose – Support*. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/209960726-Types-of-mission-Which-type-of-mission-to-choose>
- PIX4D. (2020). *PIX4Dmapper - El software líder en fotogrametría para mapeo profesional con drones | Pix4D*. <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software>
- Riguero. (2020). *Clavos Topográficos 3/8"x3" - Inversiones Riguero S.A.* <https://www.invriguero.com/product/clavos-topograficos-3-8x3/?v=fff6fa4fe7dd>
- Ruipérez, P. (2015). *Diseño y fabricación de un Dron*. 119. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73170/RUIPÉREZ - Diseño y fabricación de un dron mediante impresión 3D.pdf?sequence=5](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73170/RUIPÉREZ_-_Diseño_y_fabricación_de_un_dron_mediante_impresión_3D.pdf?sequence=5)
- Sani, J., & Tierra, A. (2015). *Vehículos Aéreos no Tripulados – UAV para la Elaboración de Cartografía Control Horizontal*. Junio. [https://www.researchgate.net/publication/277596297\\_VEHICULOS\\_AEREOS\\_NO\\_TRIPULADOS\\_-\\_UAV\\_PARA\\_LA\\_ELABORACION\\_DE\\_CARTOGRAFIA\\_ESCALAS\\_GRANDES\\_REFERIDAS\\_AL\\_MARCO\\_DE\\_REFERENCIA\\_SIRGAS-\\_ECUADOR](https://www.researchgate.net/publication/277596297_VEHICULOS_AEREOS_NO_TRIPULADOS_-_UAV_PARA_LA_ELABORACION_DE_CARTOGRAFIA_ESCALAS_GRANDES_REFERIDAS_AL_MARCO_DE_REFERENCIA_SIRGAS-_ECUADOR)
- Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, 66, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2016.01.002>
- SERCOP. (2015). *Manual De Buenas Prácticas En La Contratación Pública Para El Desarrollo Del Ecuador*. 1–46.

- Trimble. (2017a). *Estación total Trimble M3 con accesorios originales*.
- Trimble. (2017b). *Sistema Trimble R8 GNSS*.
- Trimble. (2019). *Trimble R8s | Sistemas GNSS integrados | Trimble Geospatial*. <https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-r8s>
- Trinchão Andrade, B., Mazetto Mendes, C., de Oliveira Santos, J., Pereira Bellon, O. R., & Silva, L. (2012). 3D preserving xviii century baroque masterpiece: Challenges and results on the digital preservation of Aleijadinho's sculpture of the Prophet Joel. *Journal of Cultural Heritage*, 13(2), 210–214. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.05.003>
- Vidal, J. (2020). *El levantamiento fotogramétrico del patrimonio arquitectónico construido como herramienta de análisis y conocimiento: El caso del castell de la Vall de Perputxent*. 1–118.
- Villalba, N. (2016). *TOPOGRAFÍA Aplicada* (E. E. M. EIRL (ed.)).
- Watkins, S., Burry, J., Mohamed, A., Marino, M., Prudden, S., Fisher, A., Kloet, N., Jakobi, T., & Clothier, R. (2020). Ten questions concerning the use of drones in urban environments. *Building and Environment*, 167, 106458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106458>
- Wolf, P. (2016). *Topografía* (Alfaomega Grupo (ed.); Alfaomega).