

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL TÉRMICAS DE UNA MINA  
SUBTERRÁNEA MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico**

**Autor:**  
José Elias Rios Lévano

**Asesor:**  
M.Sc. Andrés Flores Espinoza

**Lima, Mayo, 2024**


### Informe de Similitud

Yo, Donato Andres Flores Espinoza, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL TÉRMICAS DE UNA MINA SUBTERRÁNEA MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES, del autor José Elias Rios Lévano, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 6%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 13/09/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 13 de septiembre de 2024

Apellidos y nombres del asesor: <u>Flores Espinoza, Donato Andres</u>	
DNI: 06017817	Firma 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2092-7666">https://orcid.org/0000-0003-2092-7666</a>	

## RESUMEN

La minería subterránea es una de las principales fuentes de desarrollo económicos en el Perú. Por lo tanto, al abordar el tema de minería en el Perú se debe priorizar la seguridad. Es por ello que a pesar de que existan diferentes reglas o protocolos al ingresar, también existen muchos accidentes. La causa principal es el desprendimiento de rocas sueltas. Estas rocas, suelen aparecer después de procesos de perforación o voladura. La detección de estas rocas sueltas suele ser realizada por operadores los cuales llaman al proceso de detección “el ojo experto”, los cuales deben indicarle a otro operador para que con una barretilla hagan caer esas rocas por seguridad (técnica del desatado de rocas). En esta investigación se busca reconstruir la mina de manera tridimensional para que un operador como un geomecánico pueda analizar las rocas y detecte si la zona diseñada tridimensional necesita ese desatado de rocas. Para reconstruir la mina, se usarán imágenes térmicas, las cuales ayudarán al geomecánico a detectar de manera precisa si la roca pertenece al grupo de rocas suelta. El proceso de desarrollo de esta investigación, consta de varias etapas: en la primera etapa se adquieren las imágenes de la mina, tanto térmicas como ópticas; luego, las imágenes pasan a la etapa donde se preprocesa y procesa las imágenes; en esta etapa se busca unir ambas informaciones, tanto térmica como óptica en una sola y mejorar la calidad de la imagen. Para optimizar la data procesada, se ordenará en carpetas correspondientes a cada proceso para que estas puedan ser importadas al programa Agisoft Metashape y este realice el proceso de fotogrametría. Por último, se colocarán puntos de control que se indicaran en las imágenes, las cuales son puntos geolocalizados. Estos puntos representan la posición exacta de la zona a examinar. Teniendo la representación tridimensional térmica, el geomecánico será capaz de detectar en la estructura de la mina, si existen rocas sueltas o no y gracias a los puntos geolocalizados, sabrá en que posición se debe hacer el proceso de desatado de mina.

A mis padres, Isabel y José, por ser mis ejemplos  
a seguir y su amor incondicional.

A mis hermanos, Marcello y Nicolás, por su apoyo  
y las alegrías diarias.

A mi familia por apoyarme e inspirarme cada día.

A mis amigos, quienes hicieron que el paso de la  
universidad tenga muy buenos momentos.



## ÍNDICE

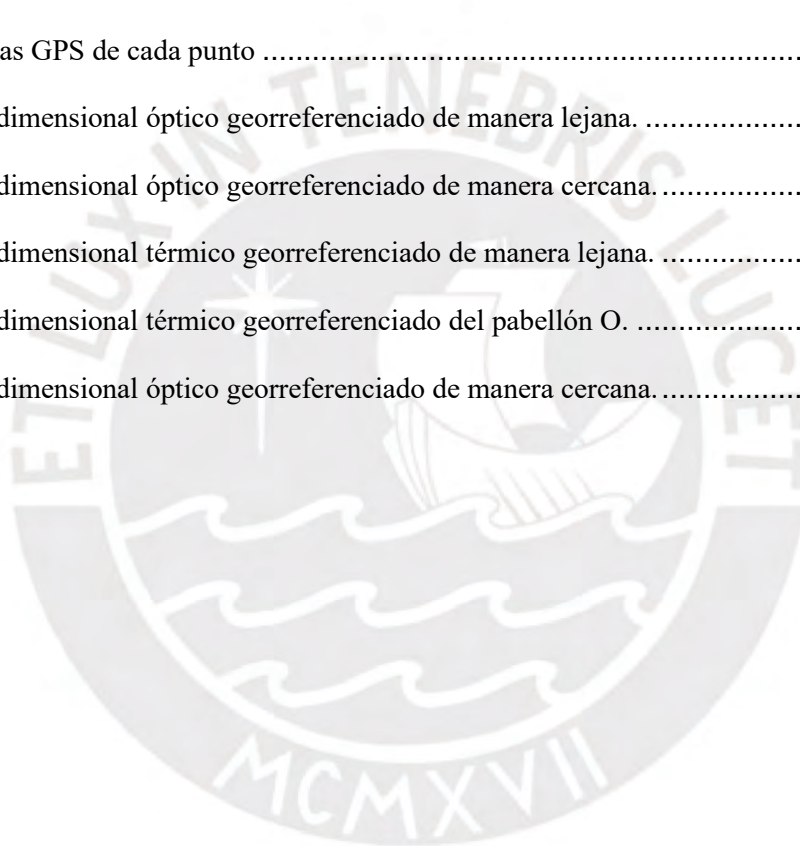
ÍNDICE I	
LISTA DE FIGURAS .....	ii
LISTA DE TABLAS .....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: MARCO PROBLEMÁTICO .....	2
<b>1.1 Planeamiento del problema</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Estado del arte</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Justificación</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Objetivos</b>	<b>13</b>
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	14
<b>2.1 Fotogrametría</b>	<b>14</b>
2.1.1 Softwares especializados en fotogrametría.....	15
2.1.2 Clasificación de Fotogrametría.....	16
2.1.3 Principios básicos de la Fotogrametría .....	20
<b>2.2 Termografía Infrarroja.</b>	<b>22</b>
2.2.1 Termografía infrarroja pasiva.....	23
2.2.2 Termografía infrarroja activa .....	23
<b>2.3 Cámaras térmicas</b>	<b>24</b>
2.3.1 Partes de una cámara térmica .....	24
2.3.2 Características de una cámara térmica.....	27
2.3.3 Principios de una Cámara térmica.....	29
<b>2.4 Registro multimodal</b>	<b>30</b>
<b>2.5 Transformada Wavelet</b>	<b>32</b>
<b>2.6 Correlación cruzada normalizada (CNN)</b>	<b>33</b>
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA PROPUESTA .....	33
<b>3.1 Modelo de solución</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Diseño del modelo</b>	<b>35</b>
3.2.1 Recolección de datos e imágenes.....	35
3.2.2 Análisis de imágenes adquiridas.....	37
CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS .....	43
<b>4.1 Descripción de la implementación</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Dispositivos</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Dato de entrada.</b>	<b>45</b>
<b>4.4 Análisis y Conclusiones:</b>	<b>56</b>
BIBLIOGRAFÍA.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Dron DJI Win 2 con montaje de la cámara MicaSense RedEdge-M e incluido el LiDAR para usar el sistema Emesent Hovermap [2].....	4
Fig. 2 Secuencia de pasos para procesamiento de imágenes del Dron DJI Win 2 [2] .....	5
Fig. 3 Riegl VZ-400 [3].....	6
Fig. 4 Algoritmo de representación 3D de una tetera usando Riegl [3].....	7
Fig. 5 Modelo de un salón, con 150 subdivisiones. [3] .....	7
Fig. 6 Resultados de la representación 3D [3].....	8
Fig. 7 Reconstrucción tridimensional con agregado de Temperatura [3] .....	8
Fig. 8 Sensor de mapeo de campo térmico [4] .....	9
Fig. 9 Validación de nube de puntos RGB para la reconstrucción a gran escala [4] .....	9
Fig. 10 Validación malla densa RGB para la reconstrucción a gran escala [4] .....	10
Fig. 11 Validación de la nube de puntos de temperatura infrarroja para la reconstrucción de escenas a gran escala [4].....	10
Fig. 12 Validación del modelo de malla densa de temperatura infrarroja para la reconstrucción de escenas a gran escala [4] .....	10
Fig. 13 Procesamiento de imágenes RGB. (a) imagen de RGB, (b) imagen de calor que representa la profundidad, (c) imagen de nube de puntos [9].....	12
Fig. 14 Generación tridimensional de un monasterio con software PIX4D [13] .....	15
Fig. 15 Procesamiento tridimensional en el software Agisoft [15].....	16
Fig. 16 Adquisición de datos mediante DRON [18] .....	17
Fig. 17 Adquisición de datos mediante Fotogrametría terrestre [19].....	18
Fig. 18 Adquisición de datos mediante satélites estéreos [20].....	18
Fig. 19 Relación entre tamaño del objeto medido, precisión de medición requerida y tecnología relevante. [21].....	19

Fig. 20 Desplazamiento de un punto debido al relieve [11] .....	20
Fig. 21 Paralaje Estereoscópico y con cota [11] .....	21
Fig. 22 Espectro electromagnético [22] .....	23
Fig. 23 Estructura interna de una cámara térmica [26] .....	25
Fig. 24 Detectores en estado sólido y bolómetro [25] .....	26
Fig. 25 ejemplo de registro multimodal con imagen MRI de una rodilla [31] .....	31
Fig. 26 Imagen de ruido eliminada con la función de eliminación de ruido de wavelet [32].....	33
Fig. 27 Esquema de Modelo de solución (Elaboración propia) .....	34
Fig. 28 Diagrama del proceso de adquisición de datos. ....	37
Fig. 29 Data tomada en la mina Orcopampa por vuelo .....	38
Fig. 30 Data tomada en la mina Orcopampa en cada vuelo .....	39
Fig. 31 Imagen óptica 3040x4056 (W) .....	39
Fig. 32 Imagen Térmica 640x512 (T).....	40
Fig. 33 Imagen térmica (T) e Imagen Óptica (W) .....	41
Fig. 34 Imagen térmica escalada(T) .....	41
Fig. 35 Imagen térmica con filtro adaptativo(T).....	42
Fig. 36 Imagen registrada .....	43
Fig. 37 Sección donde se encuentra ubicada la imagen térmica.....	45
Fig. 38 Máscara de la ubicación de la imagen T .....	46
Fig. 39 Máscara de la ubicación de la imagen T con RGB .....	46
Fig. 40 Recorte de la imagen seleccionada .....	47
Fig. 41 Imagen fusionada .....	47
Fig. 42 Imagen fusionada dentro de la imagen W .....	48
Fig. 43 Set de imágenes tanto ópticas como térmicas. ....	48
Fig. 44 Fotogrametría con imágenes ópticas en PhotoScan. a) Puntos de amarre. b) Nube de puntos sólido. c) Mallado.....	49

Fig. 45 Fotogrametría con imágenes ópticas en PhotoScan, mallado .....	49
Fig. 46 Características del diseño 3D óptico.....	50
Fig. 47 Fotogrametría con imágenes ópticas y térmicas en PhotoScan, mallado con texturas. ....	51
Fig. 48 Fotogrametría con imágenes ópticas y térmicas en PhotoScan, mallado con texturas (Otra parte de mina). ....	51
Fig. 49 Correlación de imágenes en la mina .....	52
Fig. 50 Escaleras del cuarto piso del pabellón O de la PUCP.....	52
Fig. 51 Coordenadas GPS de cada punto .....	53
Fig. 52 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera lejana. ....	54
Fig. 53 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera cercana. ....	54
Fig. 54 Modelo tridimensional térmico georreferenciado de manera lejana. ....	55
Fig. 55 Modelo tridimensional térmico georreferenciado del pabellón O. ....	55
Fig. 56 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera cercana.....	56



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 RECEPTOR ÓPTICO [24] .....	25
Tabla 2 DETECTOR INFRARROJO [24] [25] .....	26
Tabla 3 CIRCUITO DE PROCESAMIENTO .....	26
Tabla 4 Características de una cámara térmica [24] [27] .....	27
Tabla 5 Especificaciones del dron a utilizar .....	35
Tabla 6 Especificaciones de la cámara a utilizar .....	36



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo la reconstrucción tridimensional térmica de una mina subterránea con el fin de examinar las zonas de posibles riesgos e identifique las rocas sueltas que estén presentes. Para realizar este proceso, es necesario tener conocimiento de cómo se generan las rocas sueltas y terminologías usadas en la minería.

La investigación que se plantea en esta tesis, consta de varias etapas, las cuales serán descritas en el documento en cuatro capítulos. En el capítulo 1, se detalla el contexto por el cual se realiza el estudio y los problemas encontrados en la actualidad; la justificación, por la cual, se hace necesario el desarrollo de un proceso tecnológico que permita facilitar, a ingenieros geomecánicos, la detección y ubicación de las rocas sueltas. Además, se detallan técnicas y tecnologías relacionadas a la reconstrucción tridimensional; y se plantean el objetivo principal y secundario de la investigación en la presente tesis.

En el capítulo 2, se describen los fundamentos y conceptos teóricos que son necesarios para el desarrollo y análisis de la tesis. Estas pueden ser la fotogrametría, termografía infrarroja y cámaras térmicas.

En el capítulo 3, se plantea el modelo de solución para la reconstrucción tridimensional térmica y se describe cada forma en la que se desarrolla cada etapa. Es decir, se encontrará como son los procesos de preprocesamiento de imágenes.

En el capítulo 4, se evidencian las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en cada etapa de procesamiento de imágenes, además de un resumen en el cual se comenta sobre la justificación de la investigación, los dispositivos a usarse, los datos de entrada y por último se presentan las conclusiones, recomendaciones y referencias.

## CAPITULO 1: MARCO PROBLEMÁTICO

El desarrollo de la presente tesis se enfoca en la minería subterránea peruana y los riesgos que se tienen al trabajar dentro de ella. A continuación, se presentan las tecnologías desarrolladas que permiten mapear las zonas de riesgo para que los trabajadores puedan realizar sus tareas de manera segura.

### 1.1 Planeamiento del problema

La minería peruana por muchos años ha tenido víctimas mortales, sin embargo, en los últimos 3 años han aumentado drásticamente según las estadísticas de accidentes mortales en el sector minero, elaborada por El Ministerio de Energía y Minas (MINEM). En el año 2021, la cifra de víctimas aumentó a 63, siendo esta el triple de víctimas del año 2020, el cual alcanzó a 17 víctimas mortales, siendo así, la menor cifra de muertes en minería en el transcurso de 20 años, superando las 27 víctimas del 2018 [1]. En el año 2021 el 10% de las víctimas fueron ocasionadas por derrumbes y caída de objetos, y en los años anteriores bordeaba entre el 30% [1].

El terreno de la minería es peligroso tanto para las personas como para los equipos. El MINEM indica que hay gran porcentaje de víctimas por estos temas, y esto se debe a que se desprenden rocas sueltas del techo de la mina. Estas son provocadas por los rebajes mineros o extracciones mineras, al extraer el mineral genera un espacio y estos permanecen fuerte si el macizo rocoso es lo suficientemente fuerte para mantenerse sin apoyo [1]. Por otro lado, en minería, suelen usarse explosivos para poder fragmentar el mineral, esto afecta a la roca maciza hueca generando cuñas que suelen caerse, causando así daño físico o material. Los mineros necesitan muchos permisos para poder trabajar en una mina, y uno de los requisitos más importantes, es el de seguridad del personal.

## 1.2 Estado del arte

A continuación, se mostrará una breve revisión de cada producto, instrumentos y algoritmos desarrollados en la actualidad para analizar como se está abarcando la seguridad del personal en la minería y hacer una breve comparación del estudio a realizar con los productos existentes.

### DJI Wind 2

Se usó el dron DJI Wind 2 porque podría transportar las cámaras y la iluminación, además del sistema Emesent Hovermap que en la parte de hardware permite extraer datos con tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging). Por otro lado, el software permite procesar la información donde permite visualizar el mapeo y análisis detallado. Por lo que este sistema permite que el UAV se localice y mapee simultáneamente [2].

Las imágenes radiométricas recopiladas, fueron tomadas mediante la cámara DJI Zenmuse XT debido a características como el sensor térmico de 640x512 pixeles (ayuda a la precisión de  $\pm 2C^{\circ}$ ), el rango de temperatura de  $-40C^{\circ}$ , la estabilización en tres ejes lo que hace que las imágenes sean nítidas y claras. Las características de la cámara la hacen de alta gama para aplicaciones de inspección de infraestructura [2]. Las imágenes multiespectrales se recopilaron mediante la cámara MicaSense RedEdge-M el cual recopila imágenes con 5 longitudes de ondas estrechas, recolectando a una frecuencia de 1 cuadro por segundo en archivos TIFF [2]



Fig. 1 Dron DJI Win 2 con montaje de la cámara MicaSense RedEdge-M e incluido el LiDAR para usar el sistema Emesent Hovermap [2]

La data adquirida por las cámaras fue procesada con el software Agisoft PhotoScan [2]. La data al estar en formato TIFF, se le facilitó al usuario en la alineación de puntos entre imágenes con valores térmicos, debido a que se puede ajustar la visibilidad y el filtrado de bandas al tiempo que generaba nubes de puntos fotogramétricas en 3D y malla [2]

los investigadores usaron el ensayo y error mediante la ecuación (1) en el procesamiento de imágenes donde se convertía las intensidades radiométricas en grados Celsius como banda de salida

$$(B1 * 0.04) - 273.15 = P^T \quad (1)$$

B1 = Intensidad radiométrica de píxeles

P<sup>T</sup>= Temperatura de píxel

Se usó esta ecuación para convertir intensidades radiométricas en grados Celsius como banda de salida [2].

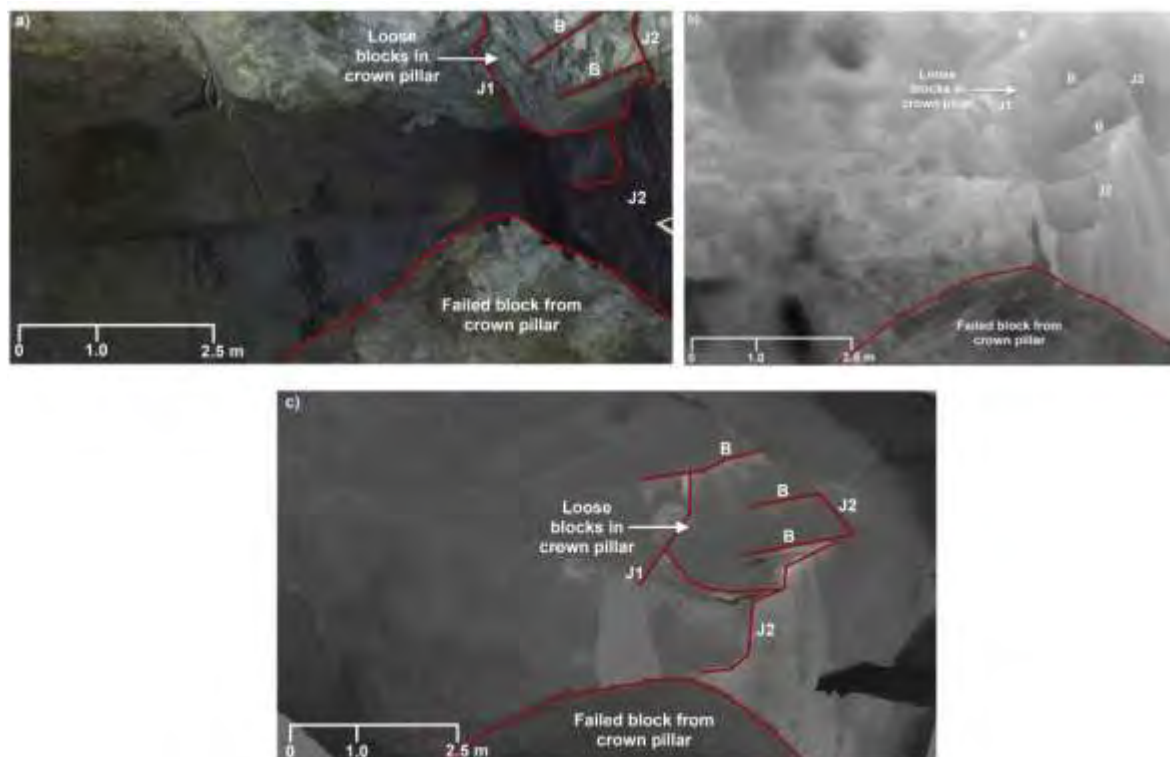


Fig. 2 Secuencia de pasos para procesamiento de imágenes del Dron DJI Win 2 [2]

En la Fig. 2. En las imágenes se puede ver que en a) es una imagen fija óptica; b) una imagen fija térmica; c) una malla térmica 3D. Los colores más claros en la malla térmica 3D indican dónde circula una ventilación más cálida a través de discontinuidades dilatadas, lo que indica que es probable que el pilar de la corona, sección de roca que queda en la parte superior de una excavación o lugar subterráneo que tiene como función soportar el peso del terreno que se encuentre encima, libere cuñas debido a un estrés excesivo adicionales [2].

### Riegl VZ-400

Es un robot capaz de generar imágenes tridimensionales mediante cámara RGB y Térmica.

El proceso que se siguió para el procesamiento de imágenes, viene dado de la técnica marcha de cubos, esta técnica va orientada a imágenes en 2 dimensiones. [3]



Fig. 3 Riegl VZ-400 [3]

Marching Cubes o marcha de cubos, es un algoritmo para extraer mallas poligonales mediante el cálculo de superficies ISO, en este caso, imágenes tridimensionales es una isosuperficie. Al tener 8 vértices hay  $2^8 = 256$  por lo que son demasiados casos

---

**Algorithm 2** Scalar Field Mapping pseudo code
 

---

**Require:** Reconstructed iso-surface and point cloud with scalars, original point cloud

- 1: Build a  $k$ -D tree for the reconstructed iso-surface model
  - 2: **for** every point  $p$  in the point cloud **do**
  - 3:   Find the nearest point  $p_m$  in the model to the point  $p$
  - 4:   Assign the scalar value of the point  $p$  in the point cloud to point  $p_m$  from the model
  - 5: **end for**
- 



Fig. 4 Algoritmo de representación 3D de una tetera usando Riegl [3]

En la Fig.4. Representa un modelo de una tetera basado en el algoritmo Marching Cube [3]. Se usó, además, en un salón en una universidad alemana. Esta representación tridimensional tiene 1003684 puntos en un espacio Euclidiano. La adquisición de datos se usó mediante 6D SLAM y siguiendo el mismo algoritmo en la Fig.4. se hizo la representación.

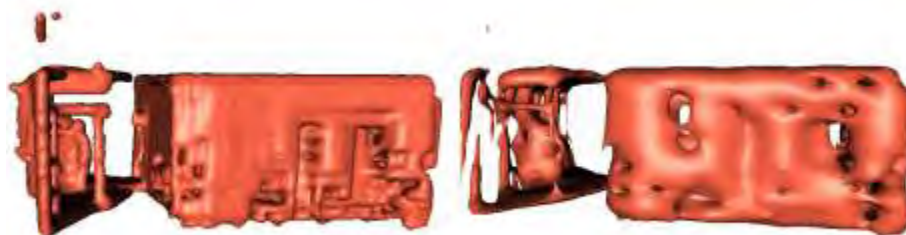


Fig. 5 Modelo de un salón, con 150 subdivisiones. [3]

Subdivision	50	100	150
Execution Time	6.3 seconds	20.4 seconds	44.1 seconds
Number of Polys	37724	167072	389340

Fig. 6 Resultados de la representación 3D [3]

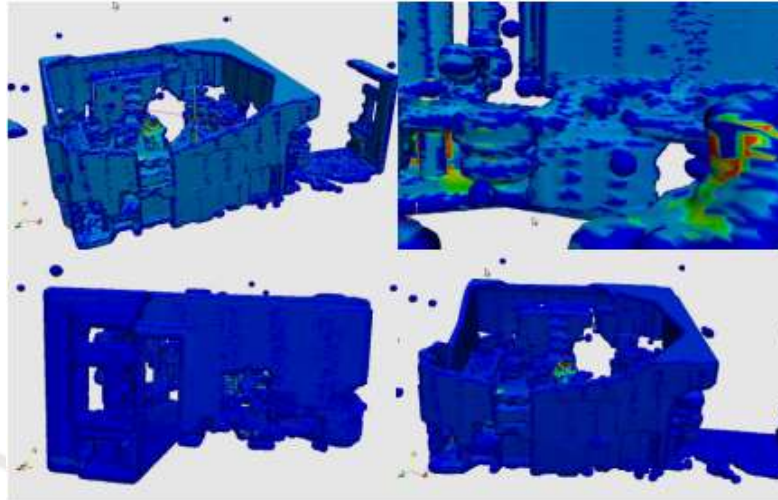


Fig. 7 Reconstrucción tridimensional con agregado de Temperatura [3]

### Handheld 3D Temperature Field Reconstruction System

El sistema de hardware utiliza dos sensores: una cámara térmica infrarroja (Optris PI450) y una cámara RGB-D (ASUS Xtion PRO). Los dos sensores están rígidamente conectados como se muestra en la Fig.8. [4]. La cámara RGB-D en sí contiene una cámara RGB, un transmisor de infrarrojo cercano y un receptor. Los transmisores y receptores de infrarrojo cercano se utilizan para obtener la información de profundidad del objeto en la escena [4].

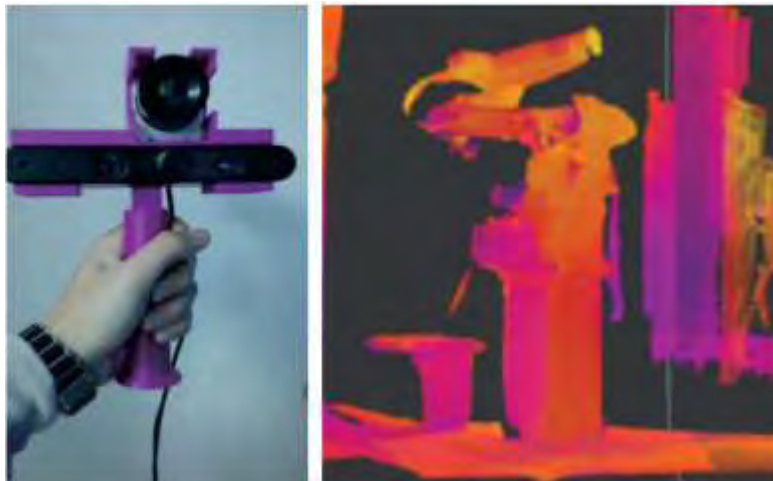


Fig. 8 Sensor de mapeo de campo térmico [4]

Lo primero que realizan es el mapeo mediante puntos en el espacio, los cuales son determinados mediante fotogrametría.



Fig. 9 Validación de nube de puntos RGB para la reconstrucción a gran escala [4]

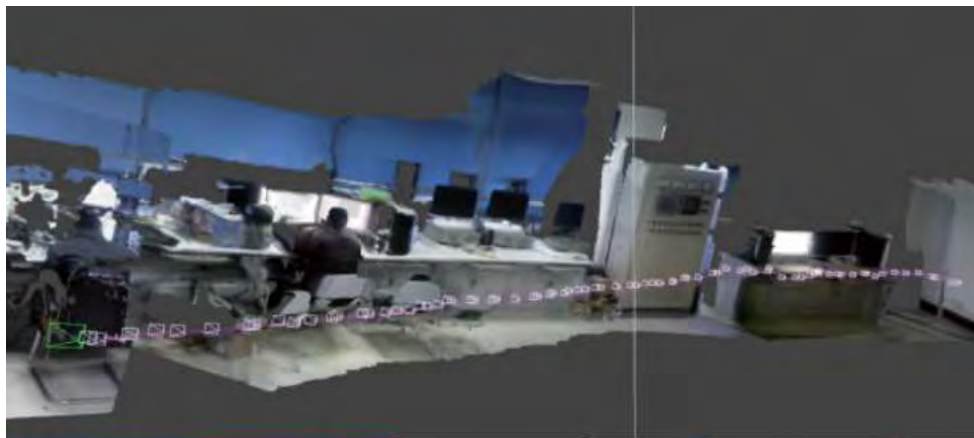


Fig. 10 Validación malla densa RGB para la reconstrucción a gran escala [4]

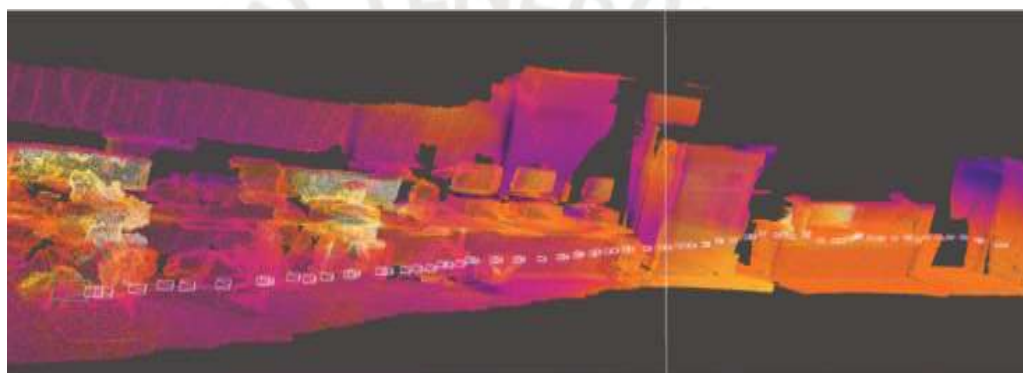


Fig. 11 Validación de la nube de puntos de temperatura infrarroja para la reconstrucción de escenas a gran escala [4]

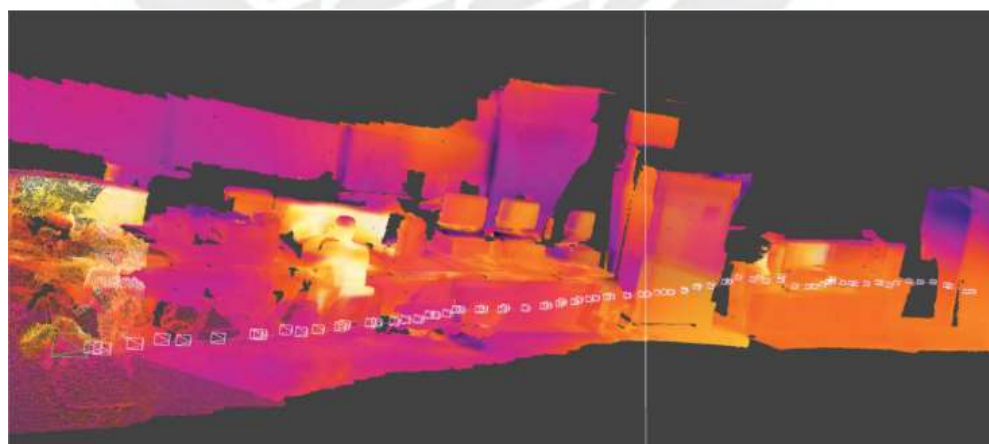


Fig. 12 Validación del modelo de malla densa de temperatura infrarroja para la reconstrucción de escenas a gran escala [4]

Entre los métodos más comunes de escáner se tiene el escáner laser, LiDAR y fotogrametría. Actualmente se ha podido observar que las cámaras RGB han podido completar el trabajo de recolectar información tridimensional detallada de interiores [5] [6]. Hay métodos en los cuales la recolección de datos de nube de puntos se subdivide en los que se basan en características conocidas y las que no [7]. Para este tipo de métodos se utiliza el algoritmo Iterative Closest Point (ICP) [8]. El cual consiste en recopilar muestras de puntos originales, determinar los puntos en coincidencia y luego filtrarlos. Para pasar de coordenadas que nos brinda la cámara y las coordenadas de píxeles se usa la siguiente fórmula de conversión [9]:

$$ZPxy = Z \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = KP \quad (2)$$

$$X = \frac{Z(x - c_x)}{f_x}, Y = \frac{Z(y - c_y)}{f_y}, Z = d$$

- Donde x e y son los valores de las coordenadas de los píxeles
- X, Y, Z son los valores de las coordenadas de la cámara
- K es la matriz de parámetros internos de la cámara
- $f_x, f_y, c_x$  y  $c_y$  son los parámetros internos de la cámara
- $d$  es el valor de profundidad de cada píxel

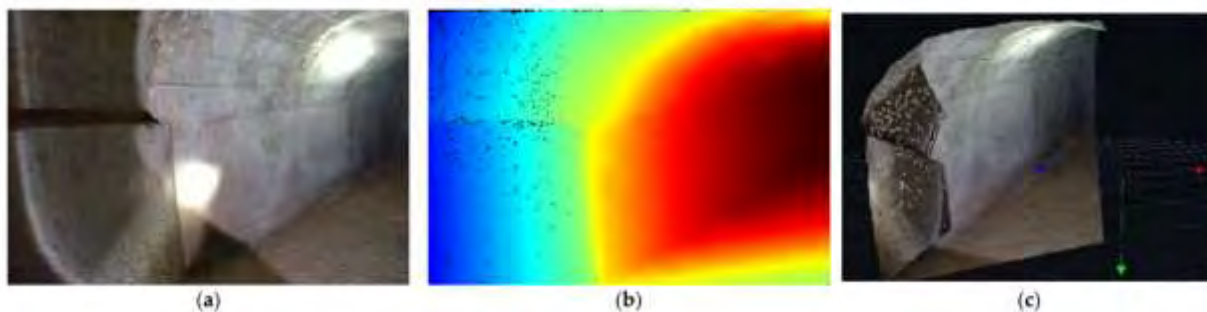


Fig. 13 Procesamiento de imágenes RGB. (a) imagen de RGB, (b) imagen de calor que representa la profundidad, (c) imagen de nube de puntos [9]

### 1.3 Justificación

En la minería subterránea, la atención al detalle es fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores y prevenir incidentes que puedan poner en riesgo su integridad física. Actualmente hay una gran necesidad de desarrollar métodos de seguridad de los operadores y las maquinarias. Es por ello que, en esta tesis, se busca desarrollar una reconstrucción tridimensional de la minería subterránea para la prevención de derrumbes y colapsos subterráneos. El trabajo se realizó conjuntamente con el grupo GI-SANT de la PUCP y el grupo INCIMMET, debido al alto interés que presentaron.

Por otro lado, también se detectó la problemática que tienen estudiantes de las carreras de Geología o Ingeniería minera, los cuales necesitan acceso a una mina, sin embargo, no se les suele otorgar permisos debido a la problemática mencionada con anterioridad. Por ello, se planea tener una gestión de la mina la cual permita monitorear las áreas en las cuales, estos estudiantes puedan acceder y seguir aprendiendo de manera práctica y segura.

Específicamente esta tesis se enfoca en la reconstrucción tridimensional de la minería para la prevención de derrumbes y la gestión de la misma. Lo cual permitirá potenciar las actividades mineras aumentando en la seguridad de las personas con acceso a la minería y reduciendo riesgos mortales.

#### **1.4 Objetivos**

En base a lo antes mencionado, se plantea el objetivo principal y los objetivos secundarios para poder proponer una solución a la problemática mencionada. Por ello el objetivo general de la tesis, es diseñar una representación tridimensional de una mina subterránea peruana tanto óptica como térmica mediante vehículos no tripulados (UAV). Además, los objetivos específicos serán los siguientes:

- Realizar el estudio de la problemática minera, para entender los conceptos de la minería en el algoritmo.
- Estudiar los diversos algoritmos de procesamiento de imágenes relacionadas con fotogrametría e imágenes térmicas.
- Realizar el registro multimodal mediante la técnica de información mutua para ubicar la imagen térmica en la imagen óptica.
- Generar el modelo tridimensional mediante software de fotogrametría considerando los tipos de imagen.
- Evaluación del modelo generado de manera cualitativa

Si bien, los UAV no están diseñados para trabajar en las condiciones que posee una mina, es por ello que podrían presentar, algunas limitaciones al operar dentro de una minar, ya sea con la presencia de obstáculos, cambios bruscos de temperatura y de la humedad, además de las señales GPS que causan interferencias en el vehículo. A pesar de ello, esta herramienta le da al operario una forma óptima de capturar información que le es de difícil acceso [10].

Finalmente, cabe resaltar el alcance de la tesis, el cual solo consta del diseño de un algoritmo que pueda ser de ayuda a una representación tridimensional térmica, más no la construcción del vehículo no tripulado

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

Como se mencionó en el capítulo anterior, la reconstrucción tridimensional térmica es el objetivo de este estudio. Para lograr este objetivo, es necesario conocer el procedimiento y métodos que se tomarán para procesar las imágenes térmicas.

Por consiguiente, se realizará el marco teórico de temas involucrado a la propuesta solución que se desarrollará. Es por ello que se profundizará en temas como la fotogrametría, la termografía infrarroja y cámaras térmicas

### **2.1 Fotogrametría**

La fotogrametría en base a medidas sacadas de fotografías, tiene como objetivo definir y analizar la forma que tendrá un objeto en el espacio, incluye dimensiones y posición del objeto [11]

Las aplicaciones de la fotogrametría se han utilizado ampliamente en el mapeo a escala de ciudades, la arquitectura, ingeniería, construcción, fabricación de prototipos, análisis científico y en la medicina [12]. Estas mediciones lo hacen programas especializados como PIX4D, los cuales hacen a gran escala el sobre solapamiento de alta cantidad de imágenes en donde se encuentran zonas repetidas para la generación tridimensional

### 2.1.1 Softwares especializados en fotogrametría

#### *PIX4D Software*

Software diseñado para trabajar con drones a una gran escala de imágenes de nubes de puntos precisas, Además, con una velocidad de procesamiento de 40% mayores en comparación a los otros softwares como Photoscan. [13]

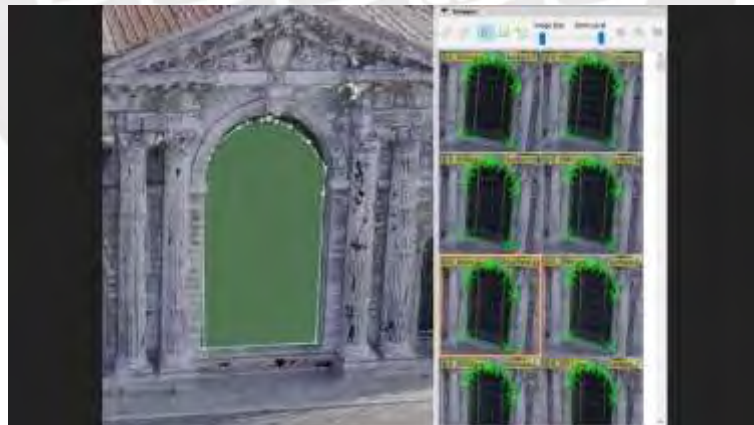


Fig. 14 Generación tridimensional de un monasterio con software PIX4D [13]

En la figura 14. Se puede ver cuales son los puntos de semejanza en ocho imágenes y como se representaría en tres dimensiones

### *Agisoft Metashape*

Software diseñado en procesar imágenes digitales para generar representaciones tridimensionales en RGB o imágenes multiespectrales que permiten sacar información espacial para luego analizarla [14]

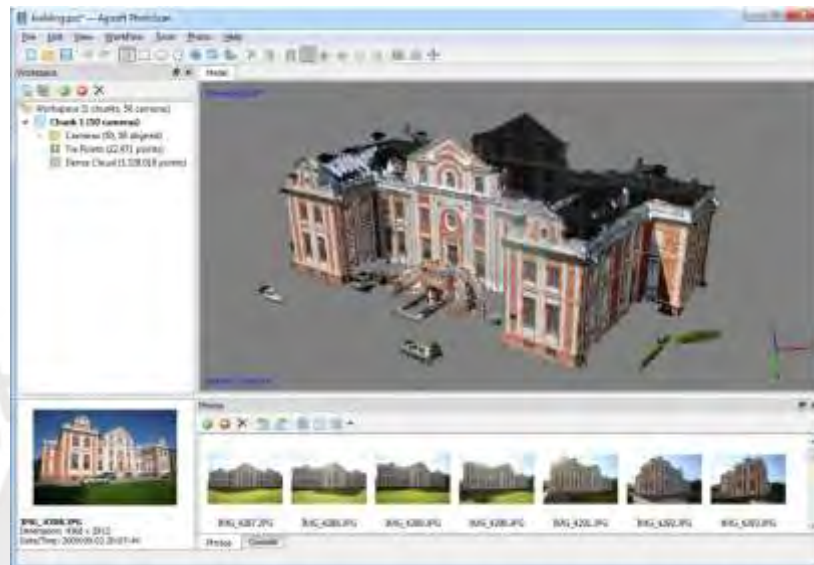


Fig. 15 Procesamiento tridimensional en el software Agisoft [15]

#### 2.1.2 Clasificación de Fotogrametría

La clasificación de la fotogrametría se subdivide en 3. La primera es según el número de imágenes empleada. La segunda es por la posición de la cámara y la distancia del objeto y la tercera es la información obtenida

##### *Según el número de imágenes*

- Fotogrametría estereoscópica, procesa pares de imágenes para recrear una ilusión tridimensional [16].
- Fotogrametría multi imágenes, consiste en procesar más de 2

imágenes para sobre solapar y poder recrear con mayor precisión las representaciones tridimensionales [16].

*Según la posición de la cámara, tipo de imagen obtenida y distancia del objeto*

### **Fotogrametría Aérea:**

Utiliza imágenes tomadas de manera aérea donde la cámara está sobre un aeroplano [16] [17].



Fig. 16 Adquisición de datos mediante DRON [18]

### **Fotogrametría Terrestre:**

Utiliza imágenes tomadas desde un punto fijo en la superficie terrestre con el eje de la cámara de manera horizontal [16] [17].



Fig. 17 Adquisición de datos mediante Fotogrametría terrestre [19]

### Fotogrametría Espacial:

Utiliza imágenes tomadas desde satélites para recrear satélites, o cuerpos rocosos no identificados [16] [17].

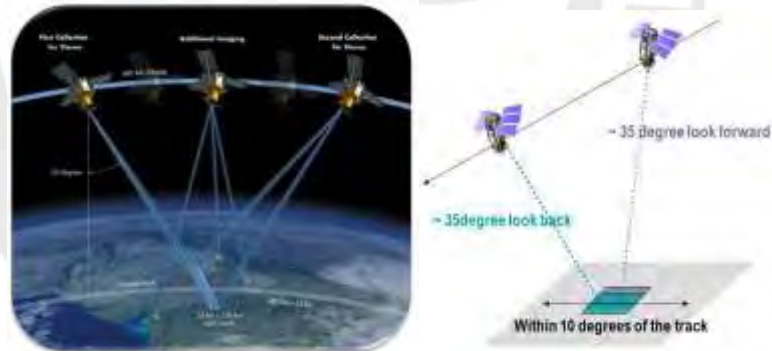


Fig. 18 Adquisición de datos mediante satélites estéreo [20]

### Fotogrametría de objeto cercano:

Fotogrametría cercana o Close Range Photogrammetry (CRP), tiene como objetivo tener medidas geométricas en una distancia de entre 10 cm a 300 m [16]

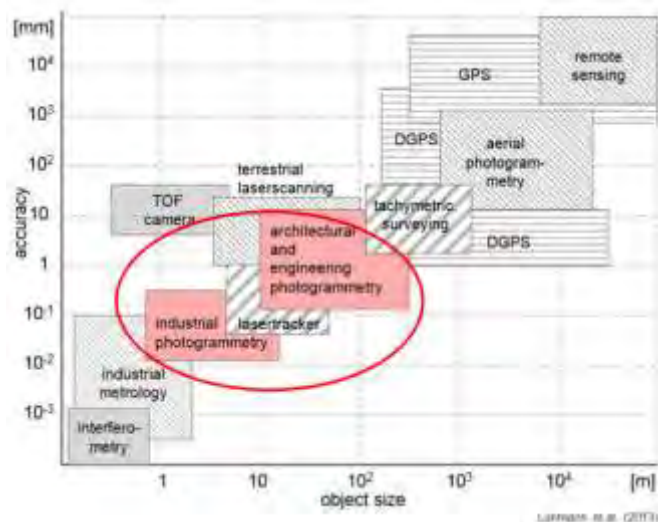


Fig. 19 Relación entre tamaño del objeto medido, precisión de medición requerida y tecnología relevante. [21]

*Según la información obtenida*

#### **Fotogrametría Métrica:**

Los datos obtenidos se utilizan para análisis cuantitativo lo que genera planos a la escala deseada, podrían ser de la forma análoga, analítica y digital. En la primera es resuelta mediante comparaciones. La segunda es mediante la resolución de modelos matemáticos. La tercera se resuelve mediante programas sistematizados [17].

#### **Fotogrametría por interpretación:**

También llamada Fotointerpretación, se centra en la representación mediante información cualitativa del terreno u objeto [17].

### 2.1.3 Principios básicos de la Fotogrametría

El principio básico de la fotogrametría se basa en el desplazamiento radial que sufre el fotograma debido al relieve que tiene. En la siguiente imagen se observa el desplazamiento en un relieve con referencia al nivel del mar [11].

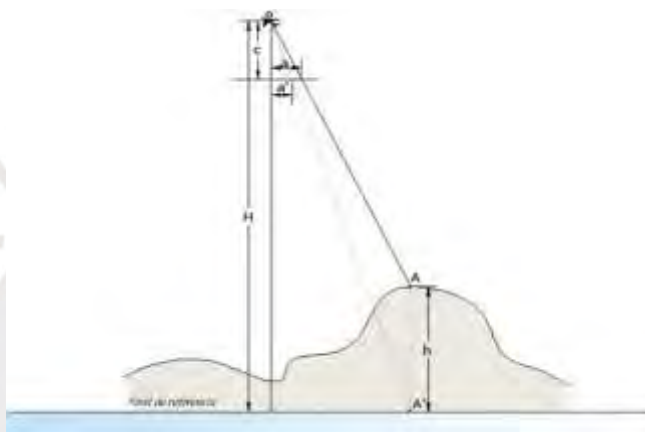


Fig. 20 Desplazamiento de un punto debido al relieve [11]

De la Fig. 20 se concluye la siguiente ecuación:

$$h = \frac{a-a'}{a} \cdot H \quad (3)$$

#### 2.1.3.1 Visión Estereoscópica

La visión Estereoscópica o Paralaje se subdivide en visión natural y artificial

Natural: Capacidad de los humanos en apreciar el relieve de las cosas [11]

Artificial: Dos imágenes tomadas desde distintos puntos de vista para generar un relieve [11]

Se define como paralaje como al cambio de posición de un punto en 2 fotografías [11].

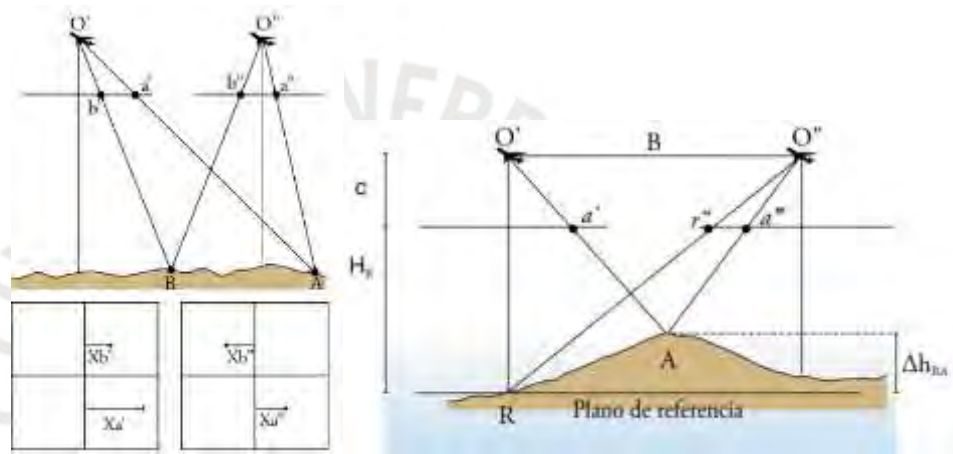


Fig. 21 Paralaje Estereoscópico y con cota [11]

Con fórmulas se representaría la ecuación de paralaje y paralaje con cota

$$Pa = xa' - xa'' \text{ \& } Pb = xb' - xb'' \quad (4)$$

$$\frac{H_R}{B} = \frac{c}{P_R} \text{ , } P_R = xR'' \quad (5)$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$\Delta H_{RA} = \frac{H_R \cdot \Delta P_R}{P_A} \quad (6)$$

Se infiere que la relación de paralaje de un punto con la elevación de ese punto es directamente proporcional y es mayor para altitudes altas [11]

## **2.2 Termografía Infrarroja.**

La termografía es una técnica que registra la radiación infrarroja emitida por un objeto la cual agrupa los datos bidimensionales de temperatura llamándolos imágenes térmicas o termogramas. Esta técnica se basa en la porción térmica infrarroja del espectro electromagnético. [22]. La energía infrarroja emitida por los objetos que se desea caracterizar se encuentra en el rango de 0.7 a 1000  $\mu\text{m}$  del espectro electromagnético de longitud de onda [23]

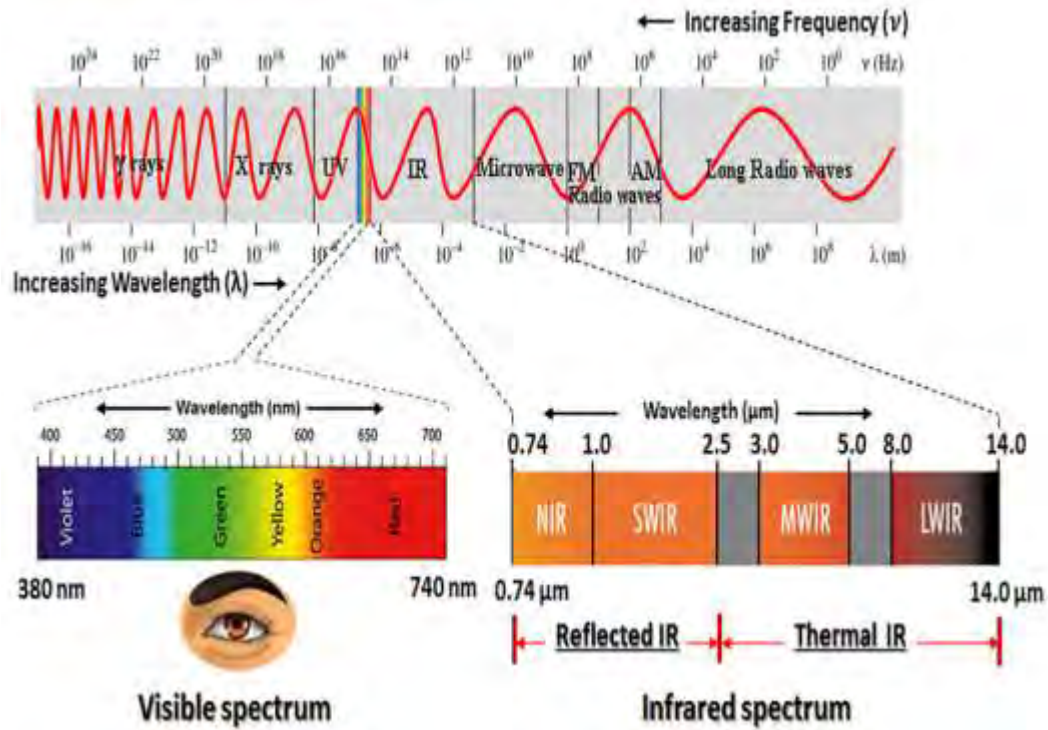


Fig. 22 Espectro electromagnético [22]

### 2.2.1 Termografía infrarroja pasiva

La termografía infrarroja pasiva es un método natural por la cual, el objeto genera calor por sí misma y esta diferencia de calor se puede estudiar [24]. Normalmente se usa para describir las propiedades térmicas que tiene el objeto estudiado

### 2.2.2 Termografía infrarroja activa

La termografía infrarroja activa necesita una estimulación externa que generen un calor al

objeto para que pueda observarse el comportamiento superficial y así poder estudiarlo [24]. Esta estimulación externa podría ser de enfriamiento o calentamiento para observar la diferencia de temperatura mediante la formula:

$$\Delta T = \frac{Q}{M(C_P)} \quad (7)$$

- $\Delta T$  : Aumento de temperatura
- $C_P$  : Calor especifico
- $Q$  : Calor ganado
- $M$  : Masa de la muestra

En investigaciones pasadas, la termografía infrarroja activa presenta mayor potencial que la termografía infrarroja pasiva. Esto se debe a la dependencia de conductividad [22]

## 2.3 Cámaras térmicas

Una cámara térmica es una tecnología compleja, a diferencia de las cámaras convencionales, no dependen de la luz ni del contraste del objeto, esto se debe a que todo objeto a nuestro alrededor genera energía térmica sin importar las condiciones ambientales. [25]

### 2.3.1 Partes de una cámara térmica

Las cámaras térmicas, de todo tipo, tienen de tres partes principalmente: El receptor óptico, el detector infrarrojo y el circuito de procesamiento [24] [25].

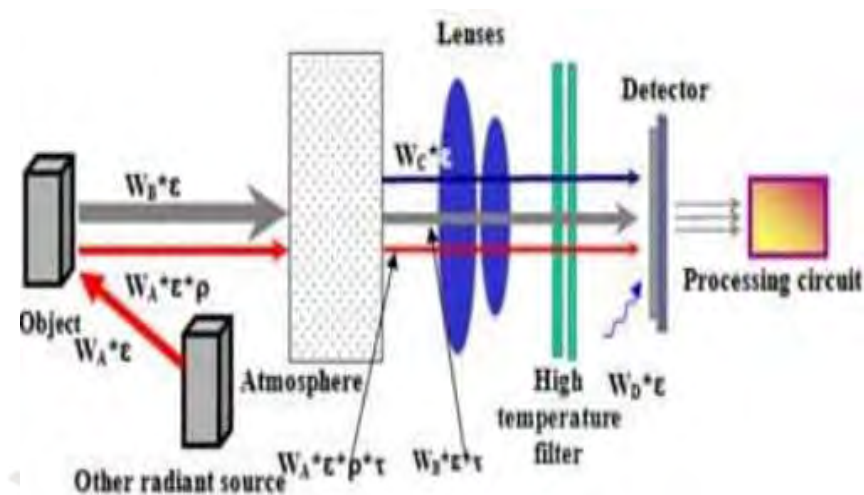


Fig. 23 Estructura interna de una cámara térmica [26]

A continuación, se mostrarán tablas referentes a las tres partes principales de una cámara térmica, La Tabla 1, nos mostrará el Receptor Óptico. La Tabla 2, nos mostrará el Detector Infrarrojo y la Tabla 3, nos mostrará el Circuito de procesamiento

Tabla 1 RECEPTOR ÓPTICO [24]

RECEPTOR ÓPTICO		
LENTE	DIAFRAGMA	FILTRO
* Donde se ingresa la energía infrarroja	*Llamado apertura	*Selecciona la cantidad de energía que ingresa al sistema

*Hecho de Germanio o Silicio	*Administra la cantidad de energía que ingresa al sistema	*Se usa en lugares abiertos para eliminar puntos de reflejo
------------------------------	---	---

Tabla 2 DETECTOR INFRARROJO [24] [25]

DETECTOR INFRARROJO		
DEFINICIÓN	ESTADO SÓLIDO (ENFRIADO)	BOLÓMETRO (NO ENFRIADO)
Elemento que convierte en señales eléctricas que pueden ser cuantificadas	*Basado en efecto fotoeléctrico	*A temperatura ambiente
	*Semiconductores expuestos a la luz infrarroja	*Arreglos de rectángulos construidos de óxido de vanadio o silicio amorfo

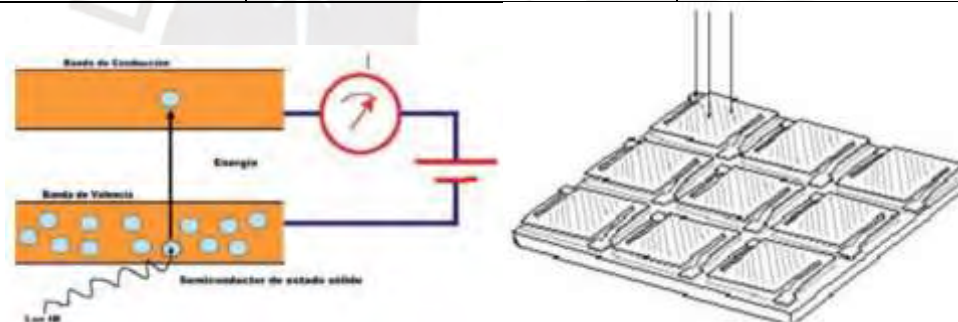


Fig. 24 Detectores en estado sólido y bolómetro [25]

Tabla 3 CIRCUITO DE PROCESAMIENTO

CIRCUITO DE PROCESAMIENTO	
DEFINICIÓN	*Convierte señal eléctrica en imágenes

	*Utilización de cuerpos negros (cuerpo u objeto que absorbe y luego emite la energía incidente en todas las longitudes de onda)
--	---

### 2.3.2 Características de una cámara térmica

Para la selección de una cámara térmica se debe tener un criterio de adquisición. A continuación, se presentará una tabla con las características de cámaras térmicas

Tabla 4 Características de una cámara térmica [24] [27]

CARACTERISTICA	
Sensibilidad térmica (NETD)	Llamada también NETD (de las siglas en ingles Noise Equivalent Temperature Difference), Como su mismo nombre lo dice, a menor sea la sensibilidad, mayor será la calidad del contraste
Rango	Intervalo de las temperaturas que alcanza la cámara, estas pueden se calibradas. Para la selección de cámaras se deberá seleccionar una con mayor rango con respecto a la aplicación que se le dará
Campo de visión (IFOV)	IFOV o <i>Instantaneous Field of View</i> se refiere al campo que se verá por el lente de la cámara termográfica en un momento determinado. Para trabajos con campo de visión cercana se usa una cámara con un ángulo de 45° o superior, si la visión es a larga distancia se necesitará entre 6° a 12°

Resolución	Se refiere a la cantidad de píxeles que puede detectar y medir una cámara para generar una imagen térmica. Es decir, la resolución determina la cantidad de detalles que se pueden ver. Cuanto mayor sea la resolución, mayor será la calidad de la imagen térmica y más precisa será la medición de temperatura
Enfoque	Las cámaras poseen 3 enfoques, el enfoque fijo, el enfoque manual y automático. El uso comúnmente requiere de cámaras con enfoque manual y automático
Rango Espectral	Pueden ser de 2 formas, rango espectral de mediana y larga onda. Se recomienda usar las ondas de mayor longitud debido a que tienen un rango de $8\mu\text{m}$ a $14\mu\text{m}$ y son muy frecuentes en compra.
Precisión	Se mide la dispersión de las temperaturas que son extraídas de un objeto o zona en particular. Las cámaras actuales pueden alcanzar entre $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$
Frecuencia de la imagen	Cantidad de cuadros por segundo que capta la cámara en tiempo real (tasas de Hz). Una frecuencia de imagen más alta permite un seguimiento más fluido de objetos, una mejor detección de cambio en la temperatura y un análisis más preciso de la escena

### 2.3.3 Principios de una Cámara térmica

La función de una cámara térmica es detectar la energía que emiten los objetos que estén por encima del cero absoluto y estén en la longitud de onda entre 0,74  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$ . Como se mencionó anteriormente, el método de imágenes térmicas se basa en la ley del cuerpo negro la cual la cantidad de energía emitida por un objeto depende de su temperatura y su emisividad ( $\varepsilon$ ) variando en 0 si es un cuerpo blanco perfecto o un 1 si es un cuerpo negro perfecto. Para determinar la energía emitida se calcula mediante la ley de Planck [22].

$$I(\lambda, T) = \left(\frac{8\pi hc}{\lambda^5}\right) \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1\right)^{-1} \quad (8)$$

Donde:

- I: Intensidad de radiación
- h: Constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$ )
- c: Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
- k: Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )
- $\lambda$ : Longitud de onda (m)
- T: Temperatura (K)

Por otro lado, la integración de la intensidad energética total en todas las longitudes de onda se basa en la ley de Stefane-Boltzmann [22]:

$$E = \left[\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}\right] \times T^4 \quad (9)$$

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (10)$$

Donde

- E: Excitación o la cantidad total de energía emitida [ $W/m^2$ ],
- $\sigma$ : Constante de Stefane-Boltzmann ( $5.676 * 10^{-8} [W * m^{-2} * K^{-4}]$ )
- T: Temperatura absoluta (K).
- $\varepsilon$ : Emisividad de la superficie emisora

Por ello, medir la intensidad de energía emitida nos ayuda a estimar la temperatura. Como todos los objetos tienen distintas características en transmisividad ( $\alpha$ ), absorptividad ( $\rho$ ) y reflectividad ( $\tau$ ), teóricamente la suma de estas 3 características es igual a la unidad [22]

#### 2.4 Registro multimodal

El registro multimodal, consiste en alinear 2 imágenes distintas en contraste y brillo, es por ello que se usa la información mutua (MI), ya que, acomoda las intensidades de ambas imágenes para poder hacer la similitud [23]. El registro multimodal, es muy utilizado en el ámbito de la medicina, ya que, brinda a un experto información relevante para el análisis [24]

La información mutua tiene una ecuación matemática característica que dependen de una imagen A tomada mediante un sensor, y una imagen B tomada con distinto sensor.[24]

$$MI(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad (11)$$

$$MI(A, B) = \frac{H(A)+H(B)}{H(A,B)} \quad (12)$$

$H(A)$ : Variación de la intensidad en la imagen A

$H(B)$ : Variación de la intensidad en la imagen B

$H(A, B)$ : Variación de la intensidad de la imagen B con respecto a la imagen A

En conclusión, es la cantidad de información en intensidad que ofrecen cada imagen en conjunto, si tiene mayor MI tendrán mayor información que aportar [24]

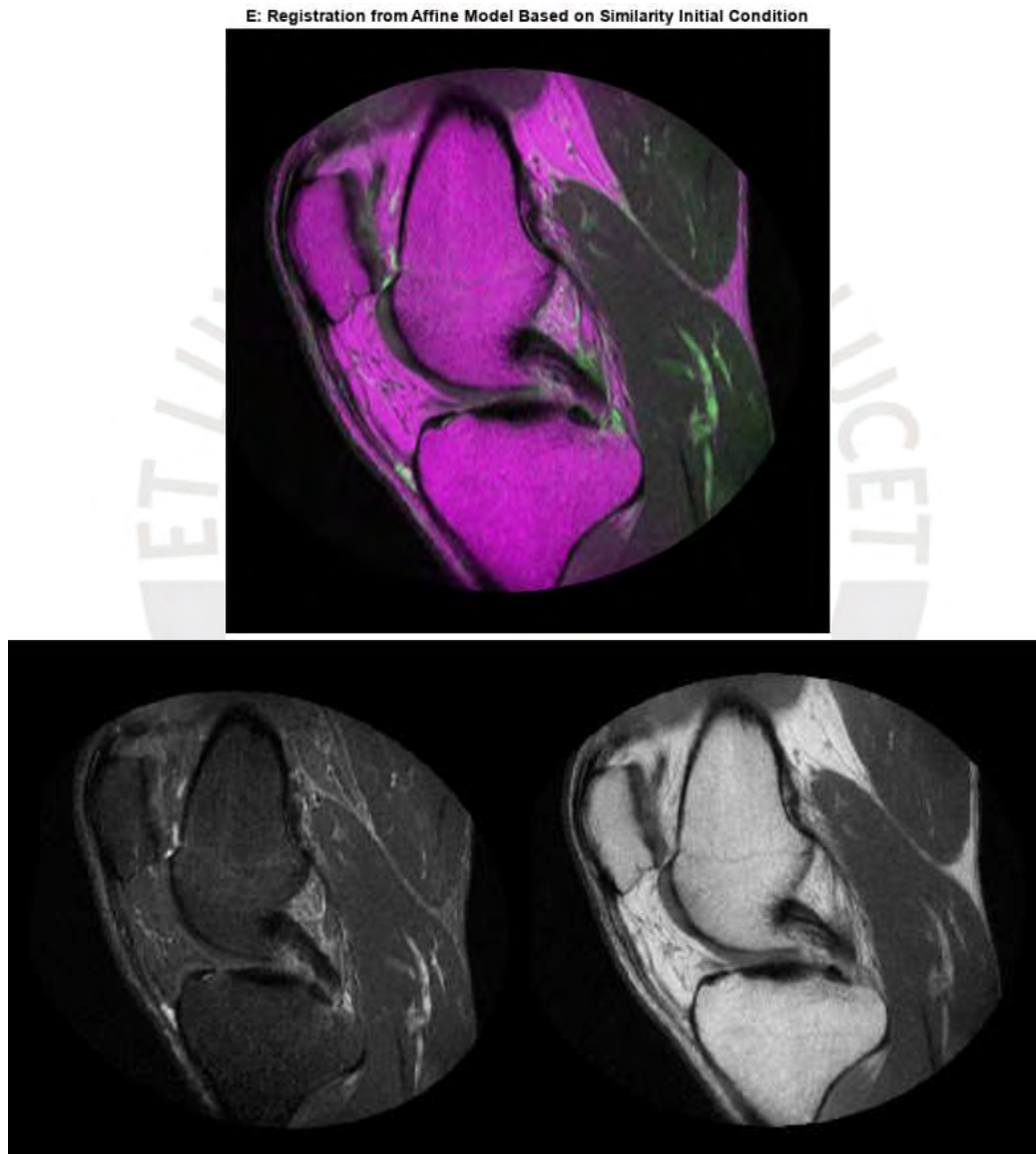


Fig. 25 ejemplo de registro multimodal con imagen MRI de una rodilla [31]

## **2.5 Transformada Wavelet**

Las transformadas wavelets ofrecen una poderosa técnica para analizar datos con patrones complejos, descomponiendo señales en wavelets escalables que capturan características en múltiples escalas. A diferencia del análisis de Fourier, que se centra en ondas sinusoidales, el análisis wavelet utiliza wavelets personalizables para representar datos de manera más flexible. Esto permite una representación eficiente de datos con transitorios y regiones uniformes, como señales de audio o imágenes con bordes. Las transformadas wavelets son una herramienta valiosa para analizar datos complejos en varios campos.

### **2.5.1 Transformada continua**

La Transformada Wavelet Continua (CWT) es ideal para analizar señales no estacionarias, cuya representación en frecuencia cambia con el tiempo. A diferencia de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), la CWT utiliza ventanas de tamaño variable para dividir el plano tiempo-frecuencia. Esto permite analizar fenómenos de baja frecuencia con ventanas más anchas y fenómenos de alta frecuencia con ventanas más estrechas. La CWT es útil para estudiar comportamientos transitorios, frecuencias cambiantes y tendencias lentas en señales complejas.

### **2.5.2 Transformada discreta**

La Transformada Wavelet Discreta (DWT) es útil para comprimir y denoizar señales e imágenes, preservando características clave. A diferencia de la CWT, la DWT discretiza las escalas de forma más burda, lo que la hace ideal para análisis multirresolución. La DWT permite dividir señales en

componentes significativos y interpretables, facilitando su análisis y comprensión.

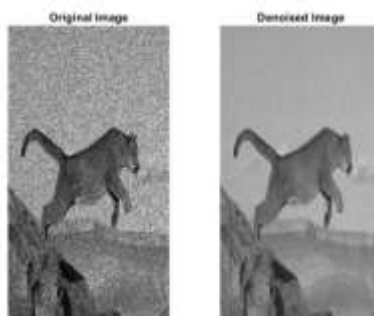


Fig. 26 Imagen de ruido eliminada con la función de eliminación de ruido de wavelet [32]

## 2.6 Correlación cruzada normalizada (CNN)

La correlación cruzada es una técnica fundamental en procesamiento de imágenes, utilizada en registro de imágenes, detección de objetos y reconocimiento de patrones. Permite medir la similitud entre imágenes, alineándolas y comparándolas en diferentes posiciones. Existen dos tipos: correlación cruzada normalizada, que normaliza las imágenes antes de calcular la correlación, y correlación de fase, que compara las transformadas de Fourier de las imágenes. Esto permite identificar patrones, objetos y alinear imágenes con precisión. [33]

## CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA PROPUESTA

En el presente capítulo se describe y desarrolla el diseño del sistema de procesamiento de imágenes para la reconstrucción tridimensional térmica. Este proceso se completará mediante la elaboración de diagramas de bloques, la toma de imágenes en la mina Orcopampa en Arequipa y el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes térmicas.

### 3.1 Modelo de solución

La presente investigación está orientada al desarrollo del sistema de procesamiento de imágenes para la reconstrucción tridimensional térmica de una mina subterránea. El modelo de solución de este sistema consta de varias etapas. En la primera etapa se adquieren las imágenes térmicas e imágenes ópticas de la mina Orcopampa. Luego, estas imágenes pasan por etapa de preprocesado y procesado; de esta etapa se busca alinear las imágenes térmicas con las imágenes ópticas ya que las imágenes térmicas se encuentran dentro del área de la imagen óptica, este proceso se basa en el registro multimodal que asume un comportamiento de información mutua la cual facilita de manera geométrica, encontrar la imagen térmica en la imagen óptica. Las imágenes ya procesadas serán usadas para la recopilación de imágenes que se usarán en la fotogrametría.

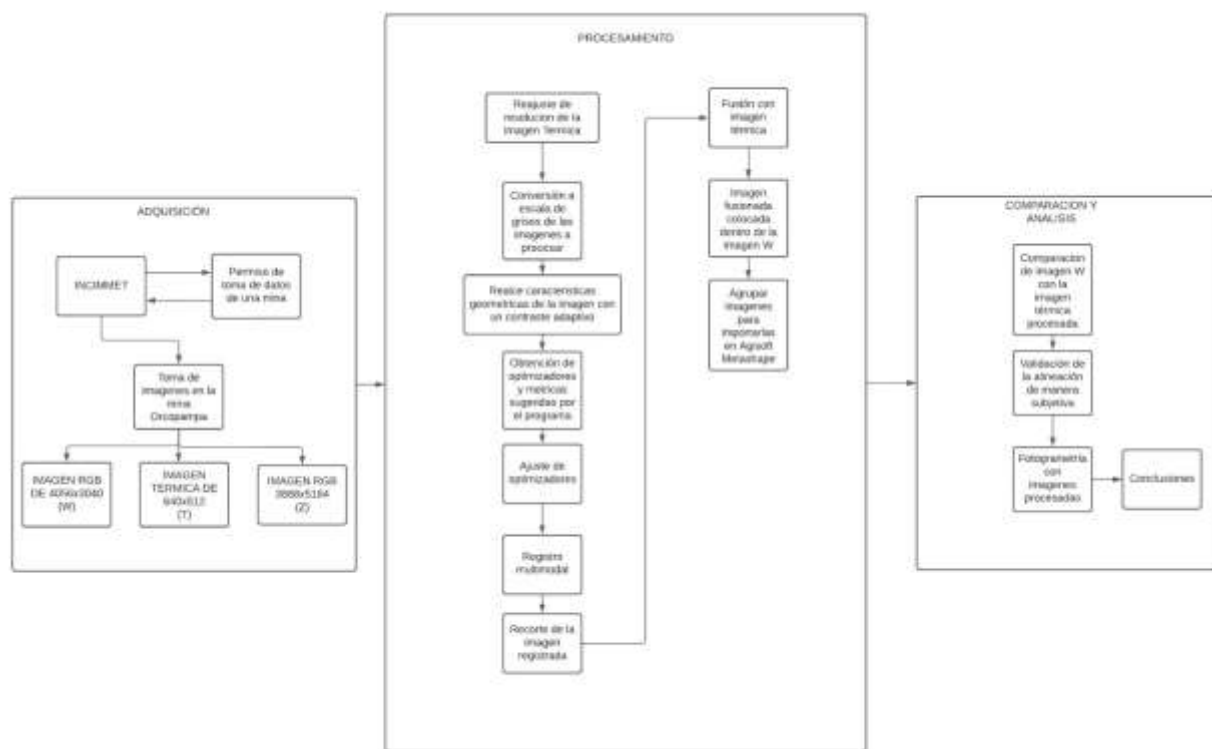


Fig. 27 Esquema de Modelo de solución (Elaboración propia)

## 3.2 Diseño del modelo

### 3.2.1 Recolección de datos e imágenes

Esta etapa consta principalmente del permiso de una mina y del dron con cámara térmica. La selección de la cámara térmica y el dron, se basa en la disposición de cámaras que cuenta la universidad (PUCP) y los drones que se usan para exploraciones mineras dispuestas por la universidad.


El dron que recolecta las imágenes será el modelo Matrice 300 RTK de la marca DJI [29] debido a las siguientes características.

Tabla 5 Especificaciones del dron a utilizar

MODELO DRON: DJI		IMAGEN
CARACTERISTICAS		
Dimensiones	895 mm (distancia diagonal entre ejes)	
Peso sin carga	6.3 kg	
Sistema de propulsion	Eléctrico (motores brushless)	
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C	
Velocidad máxima de vuelo	17 m/s	
Proyeccion IP	IP43	
Fuente de Alimentación	Bateria TB60D (52.8 V / 274 Wh)	
Tiempo de vuelo máximo	55 minutos	

Con respecto a la cámara se usará la cámara del mismo fabricante DJI, ya que también se dispone de esa cámara en el laboratorio de vehículos no tripulados. El modelo de la cámara es Zenmuse H20T [30] que cuenta con las siguientes características.

Tabla 6 Especificaciones de la cámara a utilizar

MODELO CÁMARA: ZENMUSE H20T		IMAGEN
CARACTERÍSTICAS		
Dimensiones	167 × 135 × 161 mm	
Peso	828 g	
Sensor	Microbolómetro VOx no refrigerado	
Precisión	-	
Temperatura de operación	-20 °C a 50°C	
Sensibilidad térmica	< 50 mK	
Frecuencia de la imagen	30 Hz	
Banda espectral	8 – 14 μm	
Formato de archivo de imagen	JPEG, R-JPEG	

En el permiso para adquirir datos, la comunicación con INCIMMET es fundamental, debido a que esta empresa se encarga de brindarnos los permisos para poder ingresar con nuestro dron y extraer datos reales de la mina. Además, adquirimos terminologías del rubro minero con el fin de poder entender y solucionar la problemática de esta tesis.

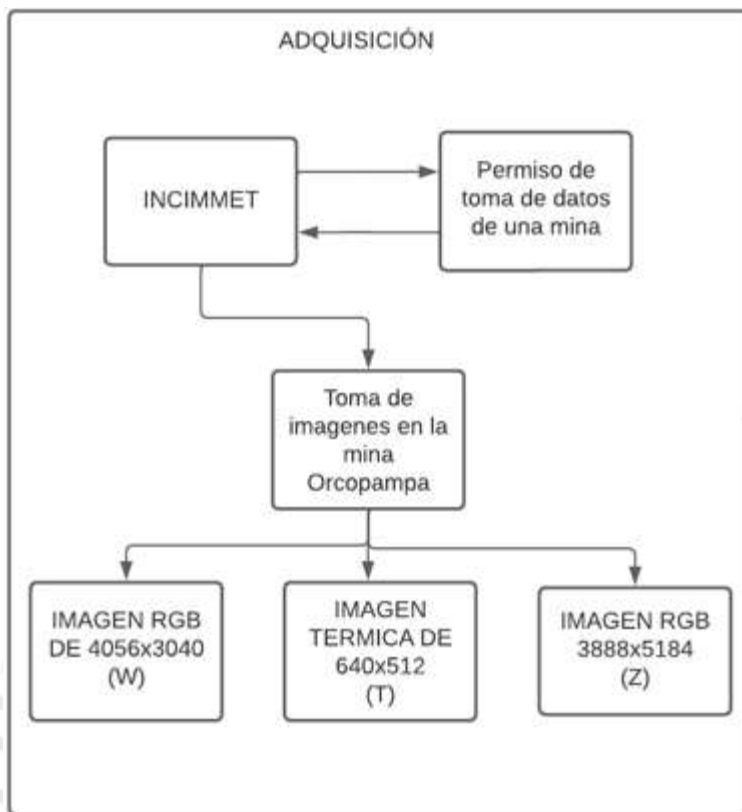


Fig. 28 Diagrama del proceso de adquisición de datos.

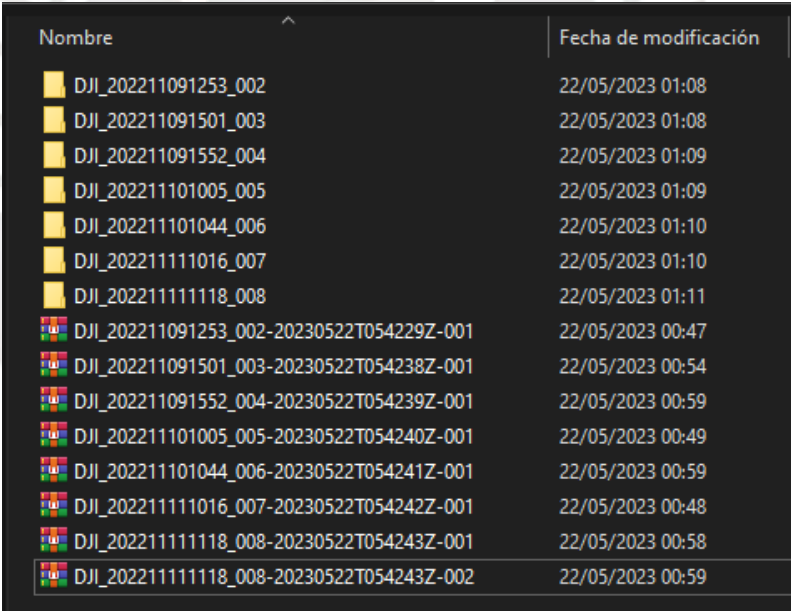
Los datos recolectados y brindados por el dron son 3 imágenes. La primera imagen es una imagen óptica de resolución 4056x3040 (W). La segunda imagen es una imagen térmica de resolución 640x512 (T). Por último, la tercera imagen es una imagen óptica zoom con resolución 3888x5184 (Z)

### 3.2.2 Análisis de imágenes adquiridas

Con mira hacia el objetivo del presente estudio, la cual es la reconstrucción tridimensional térmica de una mina subterránea. Se realizó la toma de imágenes de la mina Orcopampa, ubicada en el distrito de Orcopampa, provincia de Castilla, región

Arequipa. La mina es operada por la empresa Buenaventura, siendo el oro y la plata el principal mineral que extraen. El ingreso a la mina debe ser con un permiso y realizado en camioneta además se debe contar con los implementos de protección personal básicos (EPPS). Para la toma de imágenes en esta locación, se tuvo en cuenta que las extracciones mineras se realizan diariamente, por lo que se ubicó una zona que estuviese recientemente “liberada”, es decir, una zona libre de operarios y equipos especiales que se usan en la mina. Se realizaron la toma de imágenes el 9, 10 y 11 de noviembre del 2022.

El dron entrega las imágenes tomadas por vuelo, es decir, en cada vuelo del dron, este agrupa las imágenes y las entrega en los 3 formatos mencionados con anterioridad.



Nombre	Fecha de modificación
DJI_202211091253_002	22/05/2023 01:08
DJI_202211091501_003	22/05/2023 01:08
DJI_202211091552_004	22/05/2023 01:09
DJI_202211101005_005	22/05/2023 01:09
DJI_202211101044_006	22/05/2023 01:10
DJI_202211111016_007	22/05/2023 01:10
DJI_202211111118_008	22/05/2023 01:11
DJI_202211091253_002-20230522T054229Z-001	22/05/2023 00:47
DJI_202211091501_003-20230522T054238Z-001	22/05/2023 00:54
DJI_202211091552_004-20230522T054239Z-001	22/05/2023 00:59
DJI_202211101005_005-20230522T054240Z-001	22/05/2023 00:49
DJI_202211101044_006-20230522T054241Z-001	22/05/2023 00:59
DJI_202211111016_007-20230522T054242Z-001	22/05/2023 00:48
DJI_202211111118_008-20230522T054243Z-001	22/05/2023 00:58
DJI_202211111118_008-20230522T054243Z-002	22/05/2023 00:59

Fig. 29 Data tomada en la mina Orcopampa por vuelo

Cada carpeta o vuelo, contiene entre 200 y 300 imágenes, entre ellas las térmicas.



Fig. 30 Data tomada en la mina Orcopampa en cada vuelo

Se observa que las imágenes térmicas en la Figura 32, se encuentra dentro de la imagen óptica de resolución 3040x4056 (W), Figura 30. Es por ello que se requiere encontrar una correspondencia entre imágenes para poder tener sobre solapamiento de imágenes térmicas.



Fig. 31 Imagen óptica 3040x4056 (W)

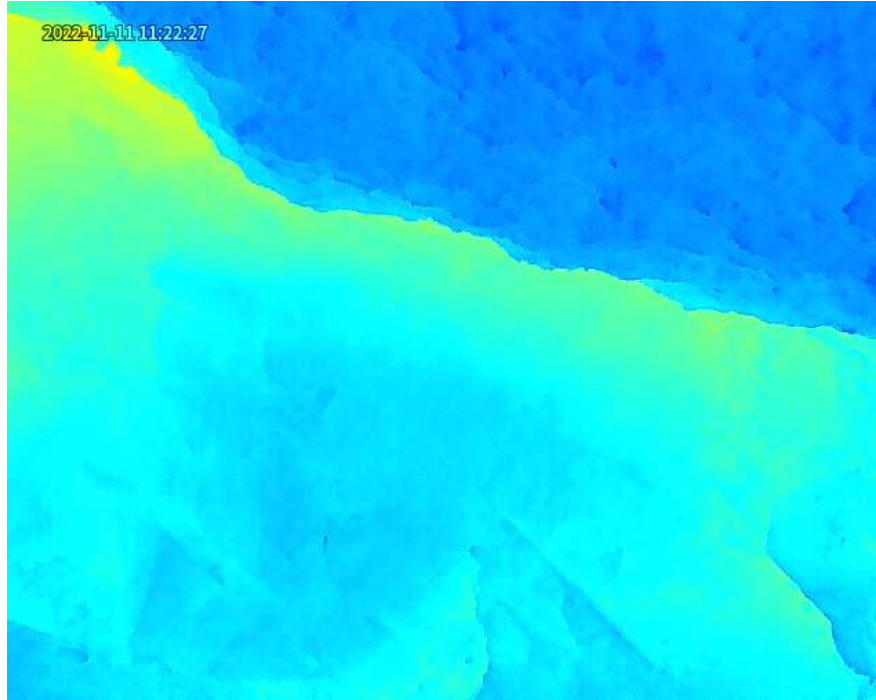


Fig. 32 Imagen Térmica 640x512 (T)

El registro multimodal es un algoritmo donde se encuentra correspondencia espacial entre múltiples imágenes. El objetivo de alinear 2 imágenes se presenta como un problema de optimización [30]. Es por ello que la solución para poder encontrar la correspondencia es basándonos en la información mutua (MI), debido a que MI se basa en la relación estadística entre ambas imágenes a registrar. Viendo el procesamiento con un enfoque multimodal, se requiere subir la resolución de una de las imágenes, ya que consisten en buscar similitud por información geométrica.

La mayoría de las medidas de similitud se basan en características debido a que son eficientes que por intensidad. Generalmente requiere cuatro pasos: (1) detección de características, (2) coincidencia de características, (3) estimación del modelo de transformación y (4) Re muestreo.

Con el objetivo de aplicar estos procedimientos a la data adquirida, se empezó a realizar un análisis de las imágenes muestra en Matlab.

En primer lugar, se empieza a transformar la imagen RGB a escala de grises para empezar el procesamiento de imágenes. Como se mencionó en el capítulo anterior.

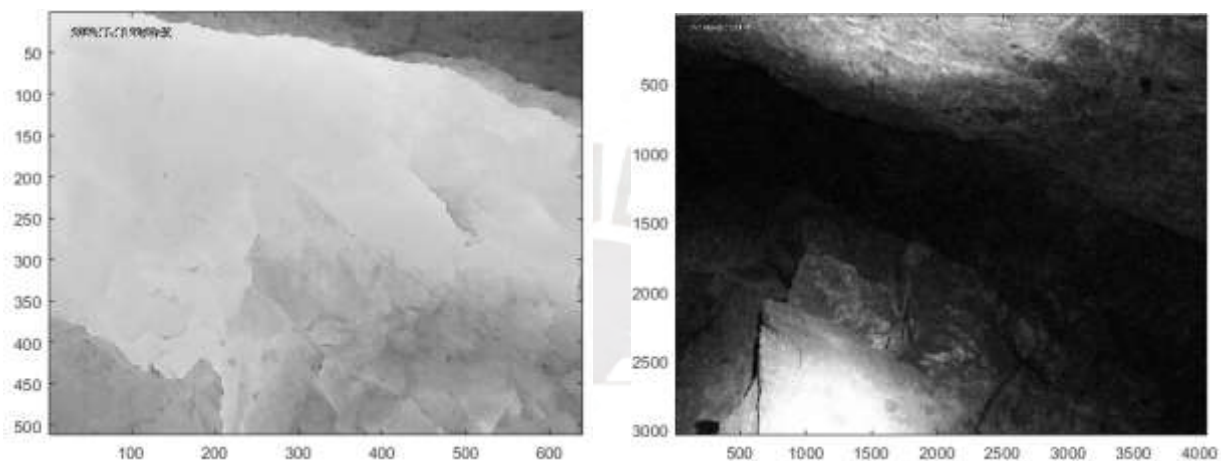


Fig. 33 Imagen térmica (T) e Imagen Óptica (W)

La resolución de la imagen W y la imagen T son distintas, por eso se hace un escalamiento de imágenes para que la imagen T tenga el tamaño adecuado y ocupe la resolución correcta.

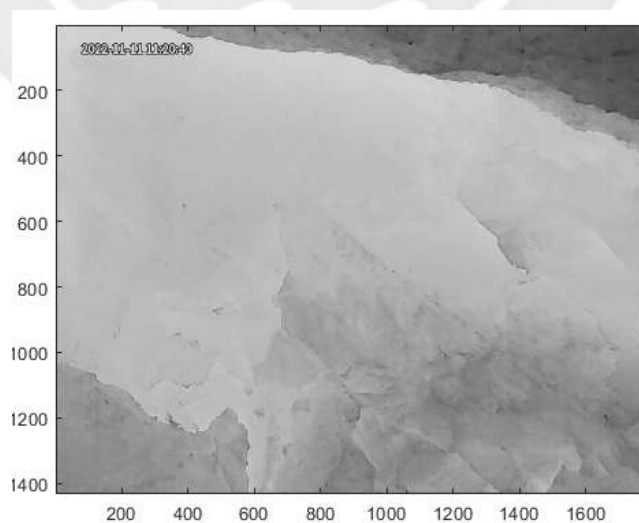


Fig. 34 Imagen térmica escalada(T)

Se le aplica un filtro adaptativo para realzar los detalles de la imagen. Este filtro adaptativo es un ecualizador local que mejora el contraste, realzando detalles en áreas oscuras o claras de la imagen (variación de iluminación local)

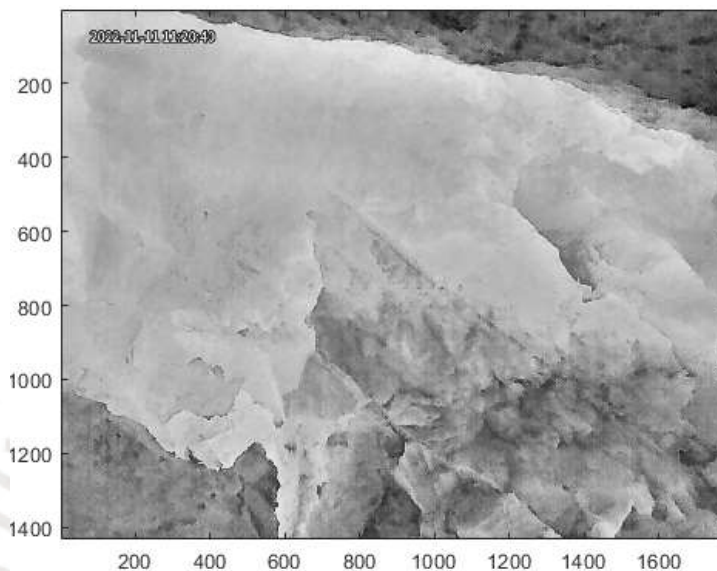


Fig. 35 Imagen térmica con filtro adaptativo(T)

Después de tener la imagen procesada, se empieza por configurar los optimizadores y métricas para encontrar la transformación geométrica que mejor alinee las imágenes de diferentes modalidades. En primer lugar, los optimizadores son los responsables de ajustar los parámetros de la transformación geométrica para encontrar la configuración óptima que maximice la similitud entre las dos imágenes. Por otro lado, la métrica, evalúa la similitud entre imágenes durante el proceso de registro.

El registro de imágenes puede ser de dos maneras. Multimodal o Monomodal. La primera es cuando las imágenes tienen distinto brillo y contraste, es decir, pueden proceder de diferentes dispositivos con diferente ajuste de exposición. La segunda, las imágenes tienen el mismo brillo y contraste ya que son tomadas con el mismo sensor.

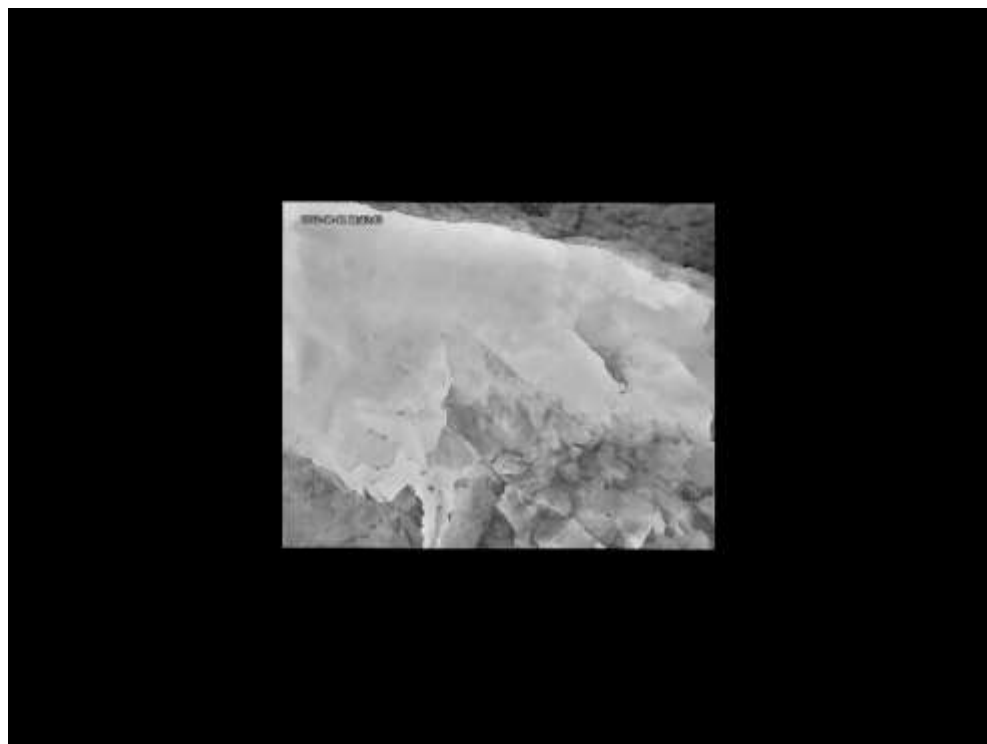


Fig. 36 Imagen registrada

Para evaluar, mediante máscaras de falso color y transparencias, se observará si la alineación es correcta o cercana a la esperada.

Con lo mencionado, se comprueba que mediante que el registro, se puede ubicar exactamente donde se encuentra la imagen térmica con respecto a la imagen óptica y esta, podrá ser considerada lista para la fotogrametría.

#### **CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS**

En este capítulo se presentarán pruebas realizadas y los resultados obtenidos en cada etapa del desarrollo de diseño del procesamiento de imágenes para la elaboración de una representación tridimensional térmica en una minería subterránea.

#### 4.1 Descripción de la implementación

Todo el procesamiento de imágenes se realizó en el programa Matlab y en el programa Agisoft Metashape Photoscan. El primero se utiliza para el preprocesamiento de imágenes, la cual es mediante información mutua, encontrar la posición exacta de la imagen térmica. Dentro de la imagen RGB gracias a la librería Image Processing Toolbox. Además, es importante mencionar que se pudo realizar máscaras de la posición exacta detectada con la misma librería.

Finalmente se realizó una fusión de imágenes RGB y la térmica lo cual generará mayor detalle de las imágenes térmicas. Este proceso se realizó con la ayuda de la librería de Wavelet Toolbox.

#### 4.2 Dispositivos

Los dispositivos de adquisición de datos a usar son el dron DJI Matrice 300 RTK y la cámara DJI Zenmuse H20T debido a la disponibilidad que se tiene en el laboratorio de Sistemas Aéreos no Tripulados, GISANT.

Todos los experimentos fueron realizados por un CPU con un procesador de 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400F @ 2.60GHz, 2592 Mhz, 6 procesadores principales, 12 procesadores lógicos con una Memoria física instalada (RAM) 16.0 GB y Laptop con Procesador AMD Ryzen 7 6800H with Radeon Graphics, 3201 Mhz, 8 procesadores principales, 16 procesadores lógicos con una Memoria física instalada (RAM) 16.0 GB. Las cuales necesitan tener una gran capacidad de memoria RAM debido a la cantidad de imágenes a procesar y una tarjeta de vídeo adecuada

para el programa Agisoft Metashape y Matlab. Cabe recalcar que los CPUs usados son debido a la disponibilidad que se tiene a ellos.

### 4.3 Dato de entrada.

#### 4.3.1 Procesamiento de imágenes.

##### 4.3.1.1. Extracción de la imagen a procesar

Al ubicar las coordenadas dadas por el registro multimodal, se realiza a extraer esa data en RGB. Los vértices para hacer el recorte son (1113, 721); (1113, 2129); (2873, 2129) y (2873, 721).

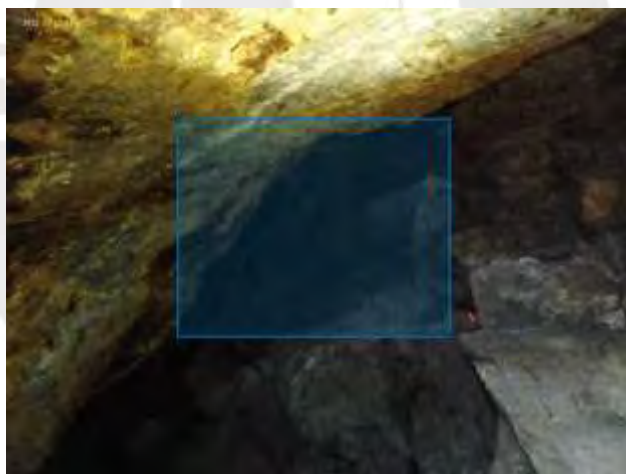


Fig. 37 Sección donde se encuentra ubicada la imagen térmica

Se procede a separar la parte seleccionada mediante mascarar como se observa en la Fig. luego mediante RGB se procede a colocar los colores correspondientes a la zona marcada.

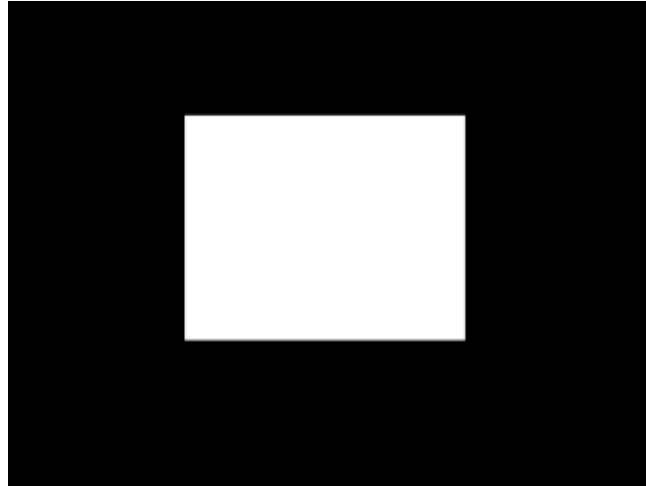


Fig. 38 Máscara de la ubicación de la imagen T

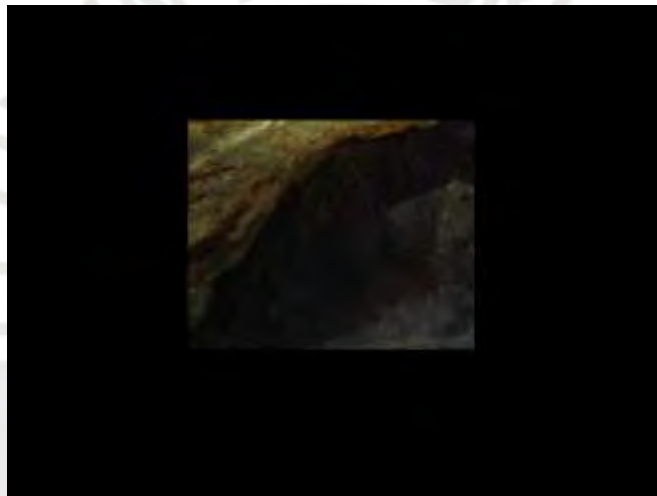


Fig. 39 Máscara de la ubicación de la imagen T con RGB

Por último, se procede hacer el recorte de la zona marcada con las coordenadas indicadas en el registro multimodal para obtener como producto final de este procesamiento, la imagen indicada en la figura Fig.



Fig. 40 Recorte de la imagen seleccionada

#### 4.3.1.2 Fusión de imágenes mediante la transformada de wavelet

Se fusionan la imagen recortada con la imagen térmica por Wavelet de tipo Coiflet debido a que resalta detalles de las imágenes que tienen alta frecuencia.

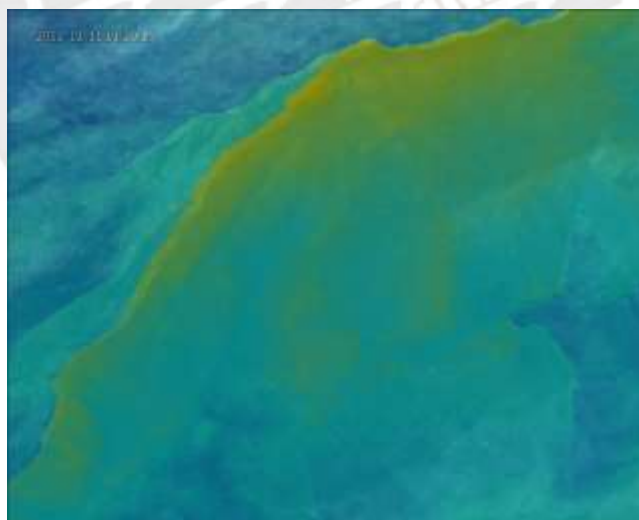


Fig. 41 Imagen fusionada

#### 4.1.1.3 Superposición de imagen fusionada en la imagen óptica.

Se superpone la imagen fusionada dentro de la imagen W para que se tenga mayor

dato en detalle de la imagen al momento de ser ingresada al programa que hará la fotogrametría.

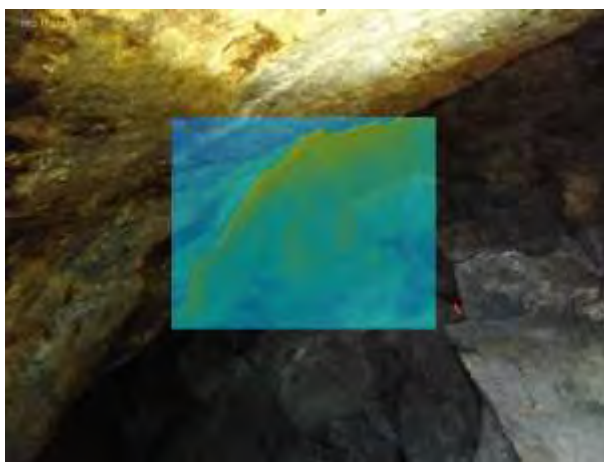


Fig. 42 Imagen fusionada dentro de la imagen W

Esta última data se recolectará en una carpeta en la cual serán las imágenes de entrada para el programa Agisoft pueda procesarla.

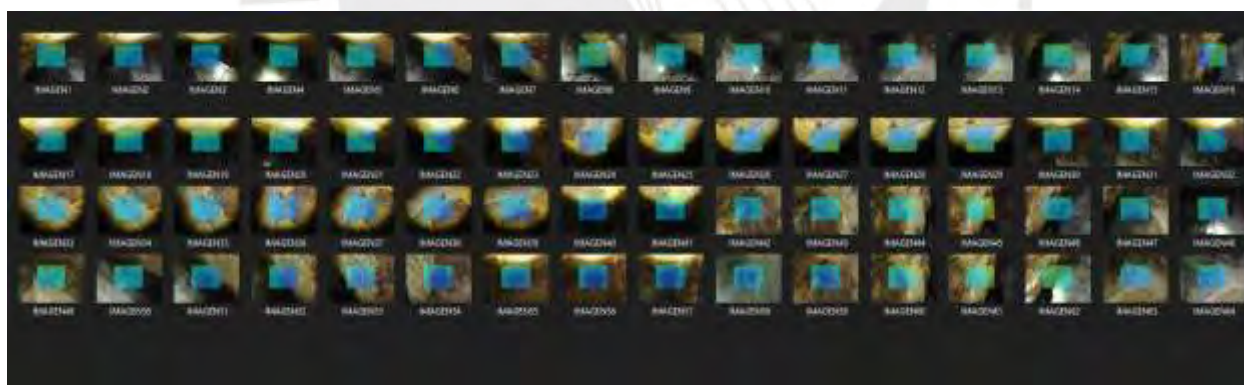


Fig. 43 Set de imágenes tanto ópticas como térmicas.

#### 4.2. Resultados en PhotoScan

Se ingresan la data óptica al programa

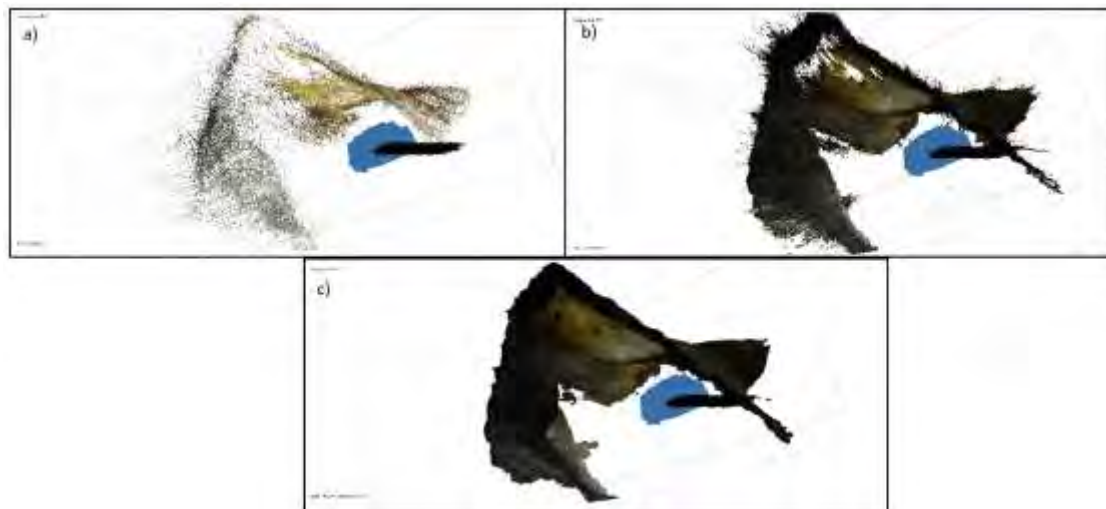


Fig. 44 Fotogrametría con imágenes ópticas en PhotoScan. a) Puntos de amarre. b) Nube de puntos sólido. c) Mallado



Fig. 45 Fotogrametría con imágenes ópticas en PhotoScan, mallado

Con las siguientes características

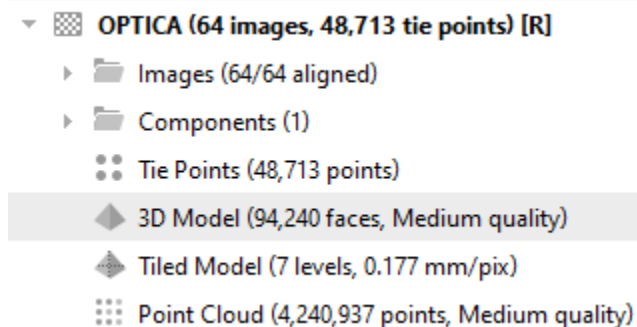


Fig. 46 Características del diseño 3D óptico

En resumen, para generar la representación tridimensional deben seguir pasos. Primer paso, se debe añadir las imágenes al software Agisoft. Segundo paso, se deberá de orientar las imágenes hasta que todas estén orientadas y no generen alertas. Tercer paso, deberán generarse una máscara y por último generamos una nube densa con lo obtenido.

Para analizar la parte térmica, se procede a hacer un cambio de ruta de las imágenes en el mallado 3D para colocar las texturas de las imágenes procesadas en las que se pueden ver tanto la parte óptica como la térmica.

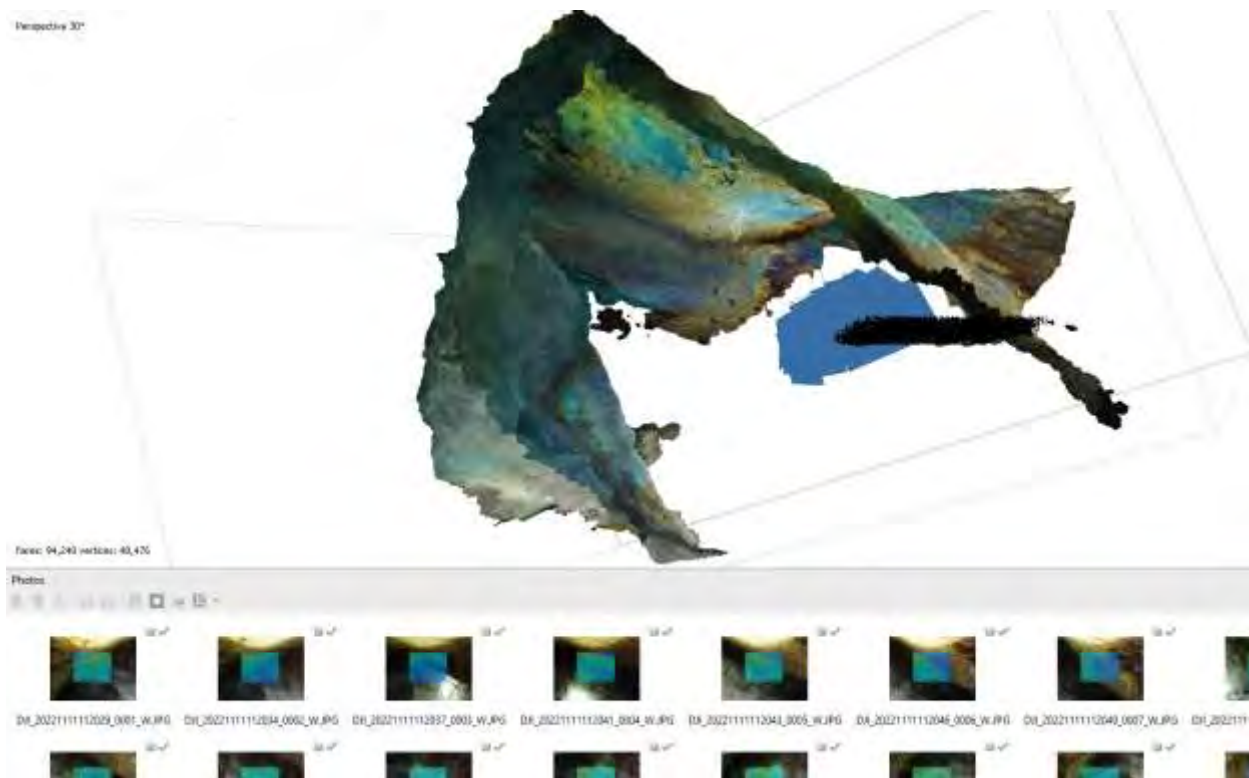


Fig. 47 Fotogrametría con imágenes ópticas y térmicas en PhotoScan, mallado con texturas.

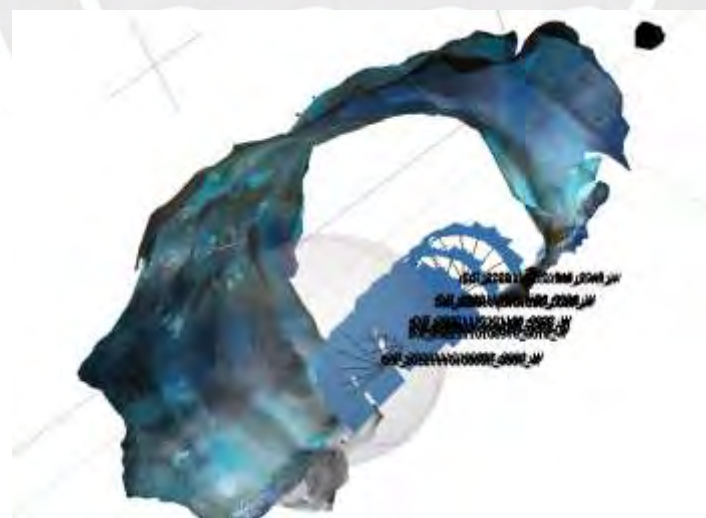


Fig. 48 Fotogrametría con imágenes ópticas y térmicas en PhotoScan, mallado con texturas (Otra parte de mina).

Analizando las correlaciones de las imágenes de la mina Orcopampa, se puede observar que varía entre 0.5 y 0.8, lo que es un buen resultado de la correlación cruzada normalizada (CNN)

```
% Se tienen las imágenes originales (fixed) y registradas (movingRegistered)
ncc = normxcorr2(fixed, movingRegistered); % Calcula la correlación cruzada
normalizada
ncc = max(ncc(:)) % Obtiene el máximo valor de la matriz de correlación
```

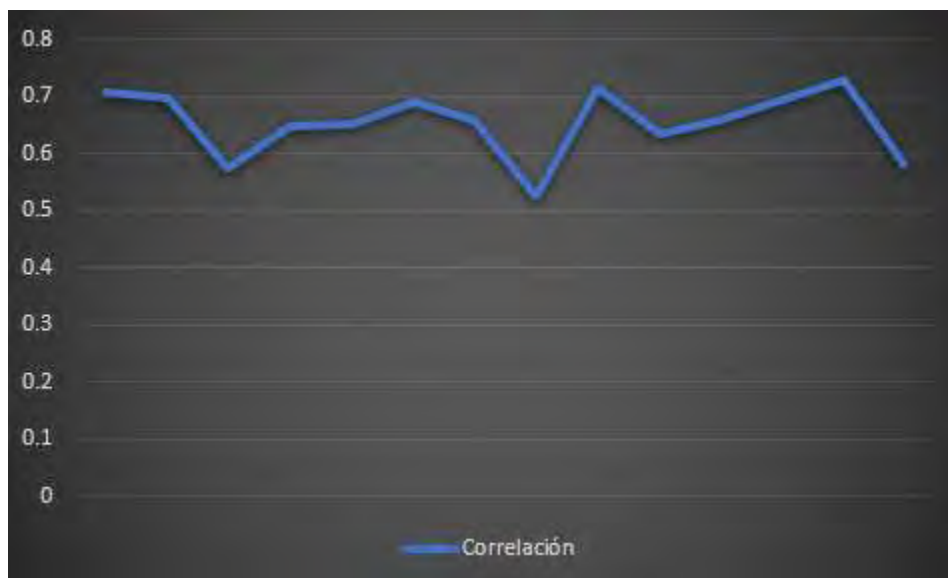


Fig. 49 Correlación de imágenes en la mina

Es un buen resultado debido a que el CNN varía entre el rango de -1 a 1.

Se realizó, además, una representación tridimensional en una habitación pequeña, el cual es parte de la escalera del pabellón O de la Pontificia universidad Católica del Perú.

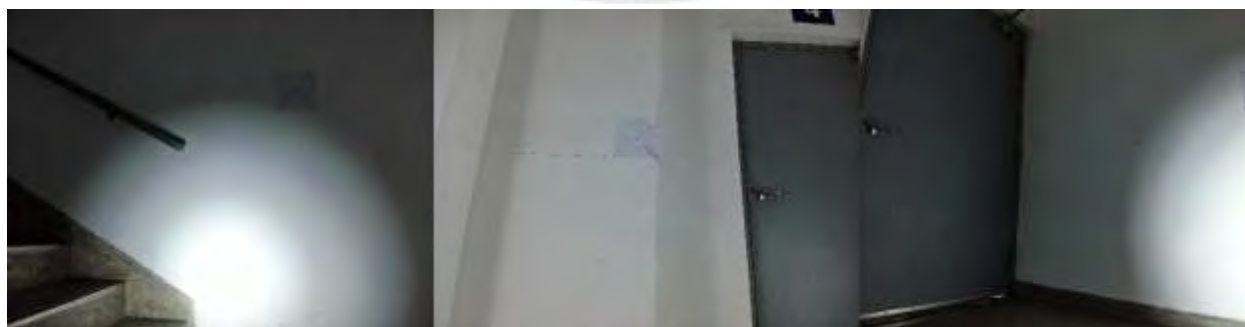


Fig. 50 Escaleras del cuarto piso del pabellón O de la PUCP.

Como se puede ver en la Fig. 39, hay 3 puntos ubicados para georreferenciarlo. Por lo que se tomaron datos de GPS como se muestra en la Fig. 50



Fig. 51 Coordenadas GPS de cada punto

Se tomaron 807 imágenes con el Dron DJI, las cuales 269 son Térmicas, 269 son ópticas panorámicas y 269 imágenes zoom ópticas. Se procedió a procesar las imágenes

En primer lugar, se ingresan las imágenes ópticas al programa Agisoft Metashape para generar la nube de puntos, luego se procede a realizar el mallado, donde se tendrá en cuenta la calidad de la representación tridimensional que se genere.

El siguiente paso es añadir puntos de control en los 3 puntos ubicados en las paredes de la escalera del Pabellón O.

Por consiguiente, se colocan las coordenadas registradas y, por último, se interpolan las imágenes térmicas para el generado de texturas.



Fig. 52 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera lejana.



Fig. 53 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera cercana.



Fig. 54 Modelo tridimensional térmico georreferenciado de manera lejana.



Fig. 55 Modelo tridimensional térmico georreferenciado del pabellón O.

Analizando las imágenes multimodales. En la siguiente figura se podrá ver la efectividad del registro multimodal en el recinto de la escalera del Pabellón O.



Fig. 56 Modelo tridimensional óptico georreferenciado de manera cercana.

Donde utilizando información cuantitativa la cual se basará en correlación cruzada normalizada (CNN)

lo cual nos da un resultado de  $ncc = 0.4704$ . Esto nos indicaría un dato aceptable

#### 4.4 Análisis y Conclusiones:

Como se observa en la Figura 31. La reconstrucción tridimensional térmica mediante fotogrametría se logra gracias a la representación tridimensional óptica en primer lugar. Esto se debe a que la construcción de fotogrametría con las imágenes térmicas procesadas, no satisfacen la representación tridimensional, es por ello que se interpolan las imágenes térmicas, luego de

generar el mallado 3D óptico y se realiza el texturizado para poder acceder a la visualización de la parte térmica.

Sin embargo, esta representación podría ser mejor si las imágenes térmicas, tienen una mayor superficie en común, esto haría que la imagen tenga aún más detalle y, sobre todo, se deberá tener en cuenta una buena iluminación.

Por otro lado, también se recomienda marcar en el interior de la mina, puntos con coordenadas específicas. Para poder tener una representación 3D geolocalizada como se vio en la representación del Pabellón O de la PUCP.

Se concluye que el registro multimodal, es una técnica útil para la alineación de imágenes por iluminación. Sin embargo, se puede mejorar optimizando por técnicas de procesamiento

Por otro lado, la técnica de fusión de imágenes utilizando wavelet, optimiza el realce de partes de frecuencias en la imagen para poder ser analizadas y representadas tridimensionalmente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] MINEM, «Ministerio de Energía y Minas,» [En línea]. Available: [https://www.minem.gob.pe/\\_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12464](https://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12464). [Último acceso: 9 2022].
- [2] R. M. Turner, M. M. MacLaughlin y S. R. Iverson, «Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery,» *Engineering Geology*, vol. 266, n° 0013-7952, p. 105470, 2020.
- [3] D. a. V. J. Osmanović, «Reconstructing the 3D thermal model of indoor environment from unorganized data set acquired by 3D laser scans and thermal imaging camera,» pp. 13-18, 2012.
- [4] S. a. F. Z. a. W. S. Zhao, «A Real-time Handheld 3D Temperature Field Reconstruction System,» *IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, pp. 289-294, 2017.
- [5] Q.-Y. a. K. V. Zhou, «Color Map Optimization for 3D Reconstruction with Consumer Depth Cameras,» *Association for Computing Machinery*, vol. 33, n° 4, pp. 0730-0301, 2014.
- [6] V. K. Qian-Yi Zhou, «Dense scene reconstruction with points of interest,» *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, n° 112, pp. 1-4, 2013.
- [7] M. Zheng, Y. Zang, F. Liang y B. Yang, «Registration Method Research of Terrestrial Laser Point Clouds from Different,» *Bull. Surv.*, vol. 8, pp. 30-34, 2015.
- [8] L. Chen, L. Sui., T. Jiang., Y. Xue y W. Huang, «The Methods of Data Registration in Terrestrial 3D Laser Scanning,» *Bull. Surv. Mapp.*, vol. 5, pp. 80-82, 2014.
- [9] H. Tai, Y. He, X. Xiangrong, C. Yan, M. Kong, X. Yang y Minglong, «RGB-D Camera for 3D Laser Point Cloud Hole Repair in Mine Access Shaft Roadway,» *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, n° 17, 2022.
- [10] R. Turner, N. Bhagwat, L. Galayda, C. Knoll, E. Russell y M. MacLaughlin, «Geotechnical Characterization of Underground Mine Excavations from UAV-Captured Photogrammetric & Thermal Imagery,» *American Rock Mechanics Association*, 2018.
- [11] E. Quiróz, *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*, Universidad de Extremadura, 2014.
- [12] I. R. Hande Isik Ozturk, «A photogrammetry based method for determination of 3D morphological indices of coarse aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 262, n° ISSN 0950-0618, p. 120794, 2020.
- [13] PIX4D, «PIX4D,» [En línea]. Available: <https://www.pix4d.com/es/acerca-de-pix4d>. [Último acceso: 11 2022].
- [14] AGISOFT, «Intelligent photogrammetry,» 2021. [En línea]. Available: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape\\_presentation.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf). [Último acceso: noviembre 2022].
- [15] AGISOFT, «Tutorial (Intermediate level): 3D Model Reconstruction of the building with Agisoft PhotoScan 1.1,» [En línea]. Available: [https://www.agisoft.com/pdf/PS\\_1.1%20Tutorial%20%28IL%29%20-%20Building.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.1%20Tutorial%20%28IL%29%20-%20Building.pdf). [Último acceso: noviembre 2022].
- [16] M. Balaguer Puig, «Fotogrametría de Objeto Cercano,» *Universitat Politècnica de València*, 2017.
- [17] O. Ocampo, *FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA*, MEDELLÍN, COLOMBIA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE DE MEDELLÍN FACULTAD DE MINAS, 2003.

- [18] ARCHITECH, «Fotogrametría / Topografía,» [En línea]. Available: <https://architech.es/nuevas-tecnologias/fotogrametria-topografia/>. [Último acceso: noviembre 2022].
- [19] PointCloud, «Nubes de puntos. Fotogrametría terrestre. Puerta San Vicente Ferrer. Valencia,» 2014. [En línea]. Available: <https://pointcloud.es/nubes-de-puntos-y-fotogrametria-terrestre/>.
- [20] E. Enterprises, «Satellite Photogrammetry».
- [21] Boehm, T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle y Jan, «Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging,» *De Gruyter*.
- [22] G. ElMasry, R. ElGamal, N. Mandour, P. Gou, S. Al-Rejaie, E. Belin y D. Rousseau, «Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications,» *Food Research International*, vol. 131, n° ISSN 0963-9969, 2020.
- [23] Maes F, Vandermeulen D, Suetens P. Medical image registration using mutual information. *Proceedings of the IEEE*. 2003; 91(10):1699–1722.
- [24] O. A. V. Martínez, «Metodología para el registro multimodal de imágenes 3D utilizando,» Pereira-Risaralda, 2014.
- [25] L. Y. Neita y E. O. Peña, «Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización,» Medellín. Colombia, 2011.
- [26] C. Prado, «Cámaras térmicas,» rnds, Argentina, 2011.
- [27] amperis, «Cámaras Termográficas,» 2021. [En línea]. Available: <https://amperis.com/productos/camaras/camaras-termograficas/>. [Último acceso: 2022].
- [28] MEDITECNA, «¿COMO ELEGIR UNA CÁMARA TERMOGRÁFICA?,» [En línea]. Available: <https://meditecna.com/blog/como-elegir-una-camara-termografica>. [Último acceso: Octubre 2022].
- [29] DJI, “Matrice 300 RTK”. <https://www.dji.com/matrice-300> [Último acceso: Mayo 2023].
- [30] DJI, “Zenmuse H20 Series”. <https://www.dji.com/zenmuse-h20-series> [Último acceso: Mayo 2023].
- [31] MATLAB, «Register Multimodal MRI Images,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/registering-multimodal-mri-images.html>. [Último acceso: Junio 2023].
- [32] MathWorks, «Wavelet Transforms,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/discovery/wavelet-transforms.html>. [Último acceso: 2023].
- [33] FasterCapital, «Termino correlacion cruzada en el procesamiento de imagenes,» 7 junio 2024. [En línea]. Available: <https://fastercapital.com/es/tema/ventajas-de-la-correlaci%C3%B3n-cruzada-en-el-procesamiento-de-im%C3%A1genes.html#:~:text=La%20correlaci%C3%B3n%20cruzada%20normalizada%20se,comparando%20sus%20transformadas%20de%20Fourier..> [Último acceso: 2024].