



**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE TOPOGRAFÍA Y GEODESIA**

**APLICACIÓN DE DRONES EN PROYECTOS TOPOGRÁFICOS: INNOVACIÓN  
TECNOLÓGICA EN EL TRABAJO DEL TOPÓGRAFO MODERNO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
LIC. ING. EN TOPOGRAFÍA Y  
GEODESIA**

**ELABORADO POR  
MARTÍN VARGAS RÍOS  
EC-41-9558**

**PANAMÁ, 2026**

## DEDICATORIA

“A mi amada compañera de vida Denise Balcázar Quiroga, por su amor, apoyo incondicional y por ser mi roca en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi compañera en este camino y por siempre estar a mi lado. Este trabajo de grado es un testimonio de nuestro amor y compromiso mutuo”.

“A mis queridos padres Guillermo Vargas castillo y Nancy Ríos de Vargas, por su amor, paciencia y constante apoyo en cada paso de mi vida. Gracias por inculcarme valores y principios que han sido fundamentales para mi desarrollo académico y personal. Este trabajo de grado es un homenaje a su dedicación y sacrificio para brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas”.

“A mis estimados compañeros de trabajo, quienes han sido mi fuente de inspiración y motivación en mi carrera profesional. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo, y por creer en mi potencial. Este trabajo de grado es un reflejo de nuestro compromiso con la excelencia y el trabajo en equipo”.

“A mis respetados profesores, por su guía, sabiduría y enseñanzas que han sido cruciales en mi formación académica. Gracias por desafiarme a ser un pensador crítico y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis objetivos. Este trabajo de grado es un tributo a su compromiso con la educación y el desarrollo de futuras generaciones”.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar este importante proyecto y por bendecirme con la fuerza y la sabiduría para hacerlo posible. También quisiera agradecer de manera especial a mis profesores, por su incondicional apoyo y dedicación en la orientación y guía de mi trabajo de grado. Sus conocimientos y experiencia fueron fundamentales para que este trabajo se haya logrado con éxito. Sin su ayuda, este proyecto no hubiera sido posible. Les estoy eternamente agradecido por todo lo que han hecho por mí. Gracias a Dios y a mis profesores por haberme acompañado en este importante proceso de mi vida académica.

Agradezco a mi asesor Ing. Miguel Chiari por su guía y dedicación a lo largo de este proceso. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias y por motivarme a superar mis límites. Su compromiso y apoyo fueron fundamentales para lograr los objetivos propuestos.

“A mis estimados compañeros de trabajo, quienes han sido mi fuente de inspiración y motivación en mi carrera profesional. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo, y por creer en mi potencial. Este trabajo de grado es un reflejo de nuestro compromiso con la excelencia y el trabajo en equipo”.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a todas las personas que participaron en este estudio, aportando sus conocimientos, experiencia y tiempo, y a quienes de alguna manera contribuyeron en la realización de esta investigación.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo y refleja el compromiso y dedicación de todos los que participaron. Una vez más, muchas gracias a todos ellos.

## ÍNDICE

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| DEDICATORIA.....                                                   | 2  |
| AGRADECIMIENTOS.....                                               | 3  |
| ÍNDICE.....                                                        | 4  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                                              | 8  |
| GLOSARIO DE SIGLAS.....                                            | 12 |
| Capítulo I: Aspectos generales .....                               | 5  |
| 1.1. Planteamiento del problema .....                              | 5  |
| 1.2. Justificación.....                                            | 7  |
| 1.3. Objetivos .....                                               | 8  |
| 1.3.1. Objetivo general .....                                      | 8  |
| 1.3.2. Objetivos específicos.....                                  | 8  |
| 1.4. Alcances y limitaciones.....                                  | 9  |
| 1.4.1. Alcances .....                                              | 9  |
| 1.4.2. Limitaciones .....                                          | 10 |
| 1.5. Metodología general.....                                      | 11 |
| 1.5.1. Revisión bibliográfica y análisis documental.....           | 13 |
| 1.5.2. Planificación del proyecto y diseño del levantamiento ..... | 14 |
| 1.5.3 Captura de datos aéreos.....                                 | 15 |
| 1.5.4. Procesamiento fotogramétrico.....                           | 16 |
| 1.5.5 Análisis volumétrico .....                                   | 16 |
| 1.5.6. Validación y control de calidad.....                        | 17 |
| 1.5.7. Implementación de protocolos de seguridad operacional ..... | 17 |
| 1.5.8. Análisis y discusión de resultados.....                     | 18 |
| Capítulo II Marco teórico .....                                    | 20 |
| 2.1. Conceptos básicos de topografía y geodesia .....              | 20 |
| 2.1.1. Topografía .....                                            | 20 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2. Geodesia .....                                                   | 21 |
| 2.1.3. Relación entre topografía y geodesia .....                       | 21 |
| 2.1.4. Instrumentación básica .....                                     | 21 |
| 2.1.5. Importancia en la investigación.....                             | 22 |
| 2.2. Introducción a la fotogrametría aérea.....                         | 23 |
| 2.2.1 Definición y principios fundamentales.....                        | 23 |
| 2.2.2. Componentes de un sistema fotogramétrico aéreo .....             | 24 |
| 2.2.3. Tipos de productos generados .....                               | 24 |
| 2.2.5. Ventajas de la fotogrametría aérea con drones.....               | 25 |
| 2.2.7. Aplicaciones en la cantera Rock Industries, S.A.....             | 26 |
| 2.3.1. Definición y principales sistemas GNSS.....                      | 27 |
| 2.3.2. Principios de funcionamiento .....                               | 28 |
| 2.3.3. Métodos de posicionamiento en topografía.....                    | 28 |
| 2.3.4. Aplicación de GNSS en topografía y geodesia .....                | 29 |
| 2.3.5. Caso aplicado en Rock Industries, S.A. ....                      | 29 |
| 2.4.1. Definición de GCP .....                                          | 30 |
| 2.4.2. Funciones principales de los GCP .....                           | 30 |
| 2.4.3. Recomendaciones para su distribución .....                       | 31 |
| 2.4.4. Caso aplicado en Rock Industries, S.A. ....                      | 32 |
| 2.4.5. Importancia en proyectos con movimiento de tierra .....          | 32 |
| 2.5.1. Tipos de drones utilizados en topografía.....                    | 34 |
| 2.6. DJI Mavic 3 Enterprise .....                                       | 38 |
| 2.7. Software Agisoft Metashape para procesamiento fotogramétrico ..... | 42 |
| 2.8. Marco normativo para el uso de drones en Panamá.....               | 43 |
| 2.8.1. Marco legal y autoridad competente .....                         | 43 |
| 2.8.2. Requisitos para la operación de drones .....                     | 44 |
| CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....                                          | 46 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Descripción del área de estudio.....                               | 46  |
| 3.1.1. Localización geográfica de la cantera Rock Industries, S.A. .... | 47  |
| 3.2. Descripción de la empresa LaTAM Drones, Inc. ....                  | 49  |
| 3.2.2. Rol de la empresa en la presente investigación.....              | 52  |
| 3.3.1. Metodología para la toma de puntos con GNSS .....                | 53  |
| 3.3.2. Puntos de control en la cantera de rock Industries, S.A. ....    | 54  |
| 3.3.4. Tabla de coordenadas UTM de los puntos de control .....          | 76  |
| 3.4. Ejecución del vuelo fotogramétrico .....                           | 80  |
| 3.4.1 Preparación previa al vuelo .....                                 | 81  |
| 3.4.2 Desarrollo de la misión automática .....                          | 83  |
| 3.5 Procesamiento fotogramétrico.....                                   | 85  |
| 3.5.1 Flujo de trabajo.....                                             | 85  |
| 3.5.2 Parámetros utilizados .....                                       | 88  |
| 3.6.1 Procedimiento.....                                                | 89  |
| 3.6.2 Control de calidad volumétrico .....                              | 90  |
| 3.7 Validación y control de calidad (QA/QC).....                        | 92  |
| 3.8 Seguridad operacional .....                                         | 92  |
| 3.8.1 Zonas de exclusión .....                                          | 92  |
| 3.8.2 Distancias mínimas de seguridad .....                             | 93  |
| 3.8.3 Protocolos de emergencia.....                                     | 93  |
| 3.8.4 Roles del personal .....                                          | 94  |
| Capítulo IV. Análisis y resultados .....                                | 96  |
| 4.1 Procesamiento de la información fotogramétrica.....                 | 96  |
| 4.1.1 Alineación de imágenes .....                                      | 97  |
| 4.1.2 Incorporación y ajuste de puntos de control terrestre (GCP) ..... | 99  |
| 4.1.3 Generación de la nube de puntos densa.....                        | 101 |
| 4.1.4 Generación de modelos digitales y ortomosaico .....               | 104 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 Evaluación de los puntos de control terrestre (GCP) .....                     | 107 |
| 4.2.1 Metodología de evaluación .....                                             | 107 |
| 4.2.2 Resultados obtenidos para los puntos de control.....                        | 109 |
| 4.2.3 Análisis comparativo y estabilidad de la red de control .....               | 111 |
| 4.2.4 Relación con el procesamiento fotogramétrico .....                          | 114 |
| 4.3 Resultados obtenidos.....                                                     | 115 |
| 4.3.1 Ortomosaico final .....                                                     | 115 |
| 4.3.2 Modelo Digital de Elevación (MDE) .....                                     | 117 |
| 4.3.3. Resultados volumétricos .....                                              | 119 |
| 4.3.4. Análisis volumétrico global de las pilas.....                              | 126 |
| 4.4 Discusión de resultados .....                                                 | 128 |
| 4.4.1 Comportamiento y estabilidad de los puntos de control terrestre (GCP) ..... | 128 |
| 4.4.2 Precisión del modelo fotogramétrico y control de errores .....              | 129 |
| 4.4.3 Análisis de los productos generados y su utilidad práctica .....            | 129 |
| 4.4.4 Limitaciones observadas y consideraciones técnicas .....                    | 130 |
| 4.4.5 Discusión general .....                                                     | 130 |
| Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones .....                                  | 132 |
| 5.1 Conclusiones generales .....                                                  | 132 |
| 5.2 Recomendaciones para la empresa y profesionales del sector .....              | 134 |
| 5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones .....                            | 135 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                  | 136 |
| Normativa y legislación .....                                                     | 136 |
| Libros técnicos .....                                                             | 136 |
| Artículos científicos .....                                                       | 137 |
| Software y equipos .....                                                          | 137 |
| Referencias de páginas web .....                                                  | 137 |
| Legislación y regulación de drones .....                                          | 137 |
| Página institucional de la empresa .....                                          | 137 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Comparación general en levantamientos.....                                    | 22  |
| Tabla 2. Tipos de drones.....                                                          | 37  |
| Tabla 3. Especificaciones del dron Dji Mavic 3 Enterprise .....                        | 38  |
| Tabla 4. Comparación de coordenadas del PT1 .....                                      | 56  |
| Tabla 5. Comparación de coordenadas del PT2 .....                                      | 59  |
| Tabla 6. Comparación de coordenadas del PT3 .....                                      | 62  |
| Tabla 7. Comparación de coordenadas del PT4 .....                                      | 64  |
| Tabla 8. Comparación de coordenadas del PT5 .....                                      | 67  |
| Tabla 9. Comparación de coordenadas del PT6 .....                                      | 69  |
| Tabla 10. Comparación de coordenadas del PT7 .....                                     | 70  |
| Tabla 11. Coordenadas – AUX. 1 .....                                                   | 73  |
| Tabla 12. Coordenadas – AUX. 2 .....                                                   | 75  |
| Tabla 13 – Coordenadas iniciales de los puntos de control terrestre.....               | 76  |
| Tabla 14 – Coordenadas actualizadas de los puntos de control .....                     | 77  |
| Tabla 15 – Diferencias desplazamiento entre coordenadas iniciales y actualizadas ..... | 78  |
| Tabla 16. Alineación de imágenes.....                                                  | 88  |
| Tabla 17. Nube de puntos densa.....                                                    | 88  |
| Tabla 19. Rol del personal.....                                                        | 94  |
| Tabla 20. Parámetros de alineación.....                                                | 97  |
| Tabla 21. Resultados obtenidos.....                                                    | 98  |
| Tabla 22. Parámetros de generación de nube densa .....                                 | 103 |
| Tabla 23. Resultados de la nube de puntos densa .....                                  | 103 |
| Tabla 24. Resumen de desplazamientos representativos.....                              | 110 |
| Tabla 25. Desplazamientos de los puntos de control .....                               | 111 |
| Tabla 26. Resumen de volúmenes calculados .....                                        | 126 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. No.1. Diagrama de flujo planificación del levantamiento fotogramétrico..... | 15 |
| Fig. No.2. Distribución de los GCP.....                                          | 31 |
| Fig. No.3. DJI Mavic 3 Enterprise .....                                          | 35 |
| Fig. No.4. WingtraOne Gen II.....                                                | 36 |
| Fig. No.5. DJI Mavic 3 Enterprise .....                                          | 38 |
| Fig. No.7. DJI Mavic 3 .....                                                     | 41 |
| Fig. No.6. DJI Mavic 3 en vuelo .....                                            | 41 |
| Fig. No.8. Cantera Rock Industries, S.A. ....                                    | 46 |
| Fig. No.9. Cantera Rock Industries, S.A. vista desde Google maps. ....           | 47 |
| Fig. No.10. Roca madre, Cantera Rock Industries, S.A. ....                       | 47 |
| Fig. No.11. Vista Cantera Rock Industries, S.A. ....                             | 48 |
| Fig. No.14. Stand de LatamDrones Expomaquina 2026 .....                          | 49 |
| Fig. No.15. DJI M300 RTK.....                                                    | 50 |
| Fig. No.16 Pasante en el stand de LatamDrones Expomaquina 2026.....              | 51 |
| Fig. No.17. Los 7 Puntos de control de la cantera.....                           | 54 |
| Fig. No.18. punto#1 .....                                                        | 55 |
| Fig. No.19. punto#1 .....                                                        | 55 |
| Fig. No.20. Nuevo punto#1 .....                                                  | 55 |
| Fig. No.21. Punto#1 visto desde Google Maps .....                                | 57 |
| Fig. No.22. Punto#2.....                                                         | 58 |
| Fig. No.23. Punto#2 visto desde Google Maps. ....                                | 58 |
| Fig. No.24. Punto#3 visto desde Google Maps. ....                                | 61 |
| Fig. No.25. Monumento Punto#3 .....                                              | 61 |
| Fig. No.26. tabla punto#3 .....                                                  | 61 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. No.27. Punto#4 vista desde Google Maps. ....                                                | 63  |
| Fig. No.28. Monumento Punto#4 .....                                                              | 63  |
| Fig. No.29. Punto#5 vista desde Google Maps. ....                                                | 66  |
| Fig. No.30. Monumento punto#5 .....                                                              | 66  |
| Fig. No.31. Punto#6 vista desde Google Maps. ....                                                | 68  |
| Fig. No.32. Monumento Punto#6 .....                                                              | 68  |
| Fig. No.33. Punto#7 vista desde Google Maps. ....                                                | 70  |
| Fig. No.34. Monumento Punto #7 .....                                                             | 70  |
| Fig. No.35. AUX. 1 vista desde Google Maps. ....                                                 | 72  |
| Fig. No.36. Punto AUX. 1 .....                                                                   | 72  |
| Fig. No.37 AUX. 2 visto desde Google Maps.....                                                   | 74  |
| Fig. No.38. Punto AUX. 2 .....                                                                   | 74  |
| Fig. No.39. Punto AUX. 2 .....                                                                   | 74  |
| Fig. No.40. Metashape modelo ortomosaico .....                                                   | 96  |
| Fig. No.41. punto #4 desde Metashape. ....                                                       | 99  |
| Fig. No.42. Punto #1 vista desde Metashape.....                                                  | 99  |
| Fig. No.43. Punto #2 vista desde Metashape.....                                                  | 100 |
| Fig. No.44. Generación de nubes de puntos .....                                                  | 101 |
| Fig. No.45. Modelo Digital de Elevación.....                                                     | 104 |
| Fig. No.46. Ortomosaico generado desde Metashape .....                                           | 106 |
| Fig. No.47. Ortomosaico georreferenciado generado en Agisoft Metashape. ....                     | 115 |
| Fig. No.48. Modelo Digital de Elevación georreferenciado generado en Agisoft Metashape.<br>..... | 117 |
| Fig. No.49. Definición del polígono Pila #1.....                                                 | 119 |
| Fig. No.50. coordenadas de los vértices del polígono #1 .....                                    | 120 |

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. No.51. Cálculo Volumétrico .....                        | 120 |
| Fig. No.52. Pila #2 desde el MDE de Metashape.....           | 122 |
| Fig. No.53. Calculo Volumétrico desde MDE .....              | 123 |
| Fig. No.54. Pila # 3 desde MDE de Metashape.....             | 124 |
| Fig. No.55. Calculo Volumétrico desde MDE de Metashape. .... | 125 |

## GLOSARIO DE SIGLAS

DEM – Digital Elevation Model / Modelo de Elevación Digital

Término general que incluye tanto el Modelo Digital de Terreno (DTM) como el Modelo Digital de Superficie (DSM).

DTM – Digital Terrain Model / Modelo Digital del Terreno

Representación del terreno desnudo, sin vegetación ni estructuras.

DSM – Digital Surface Model / Modelo Digital de Superficie

Representación que incluye edificaciones, maquinaria, vegetación y cualquier elemento visible desde la captura aérea.

GCP – Ground Control Point / Punto de Control Terrestre

Punto con coordenadas precisas usado para ajustar y georreferenciar modelos fotogramétricos.

GNSS – Global Navigation Satellite System / Sistema Global de Navegación por Satélite

Sistema global de posicionamiento que incluye GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, entre otros.

GPS – Global Positioning System

Sistema de posicionamiento satelital estadounidense, parte del GNSS.

GSD – Ground Sample Distance / Tamaño de Pixel en Terreno

Tamaño real en el terreno representado por un píxel de la imagen captada por el dron.

LIDAR – Light Detection and Ranging

Tecnología basada en láser para obtener nubes de puntos de alta precisión (inclúyelo solo si lo mencionas en la tesis).

PA – Punto Auxiliar

Puntos de apoyo adicionales usados para control secundario o verificación.

PCI – Punto de Control Intermedio

Puntos colocados entre GCPs para reforzar el ajuste fotogramétrico (si los mencionaste).

PPK – Post Processed Kinematic

Método de posicionamiento GNSS donde las correcciones se aplican posteriormente al vuelo.

QA/QC – Quality Assurance / Quality Control

Procesos de aseguramiento y control de la calidad de los datos obtenidos.

ROI – Región de Interés

Área específica dentro del proyecto que requiere análisis o procesamiento especial.

RTK – Real Time Kinematic

Método de posicionamiento GNSS en tiempo real que proporciona precisión centimétrica.

SIG – Sistema de Información Geográfica

Herramientas y software para análisis espacial y manejo de datos georreferenciados.

SRS – Sistema de Referencia Espacial

Sistema que define cómo se orientan y proyectan las coordenadas geográficas o planas.

UAS – Unmanned Aircraft System / Sistema de Aeronave No Tripulada

Incluye el dron, control remoto, baterías y todos los sistemas asociados.

UAV – Unmanned Aerial Vehicle / Vehículo Aéreo No Tripulado (Dron)

Aeronave utilizada para la captura de imágenes y datos.

UTM – Universal Transverse Mercator

Sistema de proyección cartográfica utilizado para expresar coordenadas en metros.

WGS84 – World Geodetic System 1984

Datum global utilizado en la mayoría de equipos GNSS y software fotogramétrico.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de drones en la topografía y geodesia ha revolucionado la manera en que se llevan a cabo los levantamientos espaciales, particularmente en proyectos de gran escala y en entornos donde la dinámica del terreno representa un desafío constante. La fotogrametría aérea, apoyada en plataformas no tripuladas, permite obtener modelos tridimensionales precisos y ortomosaicos de alta resolución, optimizando así la planificación, ejecución y control de proyectos relacionados con minería, construcción y gestión territorial.

El presente trabajo de investigación se desarrolla en la empresa Rock Industries, S.A., dedicada a la explotación de agregados pétreos en la República de Panamá. El estudio se centra en la aplicación de tecnología fotogramétrica mediante el uso del dron DJI Mavic 3 Enterprise, empleado para la elaboración de inventarios volumétricos en un entorno de cantera activa. Este equipo destaca por su estabilidad de vuelo, precisión en la captura de imágenes y eficiencia operativa, características que lo convierten en una herramienta idónea para trabajos topográficos de alta exigencia.

Una de las etapas críticas del levantamiento fotogramétrico fue la implementación y verificación de los puntos de control terrestre (GCP, Ground Control Points), fundamentales para garantizar la precisión métrica del modelo generado en el software Agisoft Metashape. Durante la práctica profesional se evidenció la pérdida del Punto de Control 1, ocasionada por el tránsito constante de maquinaria pesada en la zona de trabajo. Asimismo, se constató que algunos puntos presentaban desplazamientos debido al movimiento de material propio de la actividad extractiva.

Ante esta situación, fue necesario replantear la red de control utilizando receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), además de establecer puntos auxiliares que permitieran reforzar la estabilidad geométrica del proyecto. Esta experiencia evidenció la importancia de implementar controles periódicos y procesos de validación continua en entornos dinámicos, donde las condiciones del terreno pueden variar significativamente en cortos periodos de tiempo.

El estudio tiene como objetivo demostrar no solo la aplicabilidad de los drones en la generación de inventarios volumétricos confiables, sino también la relevancia de integrar metodologías mixtas —GNSS y fotogrametría aérea— para garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados. De igual manera, se busca resaltar cómo la incorporación de estas tecnologías representa un avance significativo para el ejercicio profesional del topógrafo y geodesta, aportando mayor precisión, eficiencia operativa y seguridad en campo.

En este contexto, la investigación aporta evidencia técnica sobre la viabilidad del uso de drones como herramienta tecnológica de apoyo en la industria extractiva, documentando una experiencia real de aplicación profesional y mostrando tanto los retos enfrentados como las soluciones implementadas durante el levantamiento en Rock Industries, S.A.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal demostrar la aplicabilidad de la fotogrametría con drones como herramienta tecnológica en la elaboración de inventarios volumétricos en entornos extractivos. El estudio se desarrolló en la cantera de la empresa Rock Industries, S.A., en Panamá, donde se empleó el dron DJI Mavic 3 Enterprise térmico para la captura de imágenes aéreas y el software Agisoft Metashape para el procesamiento fotogramétrico.

La metodología implementada incluyó la planificación del vuelo fotogramétrico a una altura de 50 metros, con parámetros de superposición adecuados para garantizar la resolución espacial requerida. Asimismo, se estableció una red de puntos de control terrestre (GCP), que fueron levantados inicialmente, y luego posteriormente actualizados con una estación GNSS, debido a la pérdida del punto 1 y a los desplazamientos detectados en el resto de los puntos por el movimiento de tierra en la cantera. Para solventar esta situación, se añadieron dos puntos auxiliares que reforzaron la precisión y consistencia del proyecto.

Los resultados obtenidos permitieron generar un modelo tridimensional y un ortomosaico de alta resolución, a partir de los cuales se calcularon volúmenes de material con un alto nivel de confiabilidad. El proceso evidenció que la integración de drones con GCP debidamente verificados y ajustados constituye una metodología eficiente para la gestión y control de proyectos de explotación minera.

La investigación demuestra que el uso de drones en topografía y geodesia no solo optimiza los tiempos de levantamiento y reduce costos operativos, sino que también mejora la seguridad en campo al minimizar la exposición del personal en zonas de riesgo. Además, resalta la necesidad de mantener un control riguroso sobre los puntos de referencia, dado que en proyectos con constantes movimientos de tierra, los GCP pueden sufrir alteraciones significativas que comprometen la precisión de los resultados.

En conclusión, este trabajo aporta evidencia práctica sobre los beneficios y retos de la aplicación de drones en levantamientos topográficos, consolidando su valor como herramienta tecnológica innovadora para el ejercicio profesional del topógrafo y geodesta en la industria extractiva.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

## Capítulo I. Aspectos generales

### 1.1. Planteamiento del problema

En el campo de la topografía aplicada, los inventarios volumétricos constituyen una actividad fundamental para la planificación, control y gestión de proyectos en canteras, minas y obras de movimiento de tierras. La determinación precisa de volúmenes de material extraído o disponible impacta directamente en la planificación operativa, la estimación de costos, la sostenibilidad ambiental y la seguridad en las actividades extractivas. En este contexto, la obtención de resultados confiables en los inventarios volumétricos depende en gran medida de la precisión geométrica de los datos levantados, lo cual resulta fundamental para garantizar la exactitud de los cálculos y la correcta toma de decisiones en proyectos de ingeniería.

Tradicionalmente, estos levantamientos se han ejecutado mediante métodos topográficos convencionales, como estaciones totales y receptores GNSS en modo estático o RTK. Si bien estas técnicas ofrecen niveles adecuados de precisión, presentan limitaciones en términos de tiempo de ejecución, cobertura espacial y exposición del personal a zonas de riesgo dentro de entornos mineros activos. Por ejemplo, en áreas con taludes pronunciados o superficies inestables, el acceso del personal para la toma de datos puede resultar peligroso y requerir mayor tiempo de trabajo en campo, lo que incrementa los costos operativos y los riesgos asociados.

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la práctica topográfica representa una alternativa tecnológica que permite obtener modelos tridimensionales y ortomosaicos de alta resolución en menor tiempo y con mayor seguridad operativa. Sin embargo, la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante fotogrametría aérea depende directamente de la adecuada planificación del vuelo, la correcta implementación de puntos de control terrestre (GCP) y el riguroso control de calidad del procesamiento. En este sentido, la precisión de los productos generados no solo está determinada por la calidad de los datos capturados mediante el UAV, sino también por la exactitud y estabilidad del control terrestre, evidenciando la necesidad de una metodología mixta que integre ambos componentes para garantizar resultados confiables.

El área de estudio corresponde a la cantera operada por Rock Industries, S.A., ubicada en el corregimiento de Burunga, distrito de Arraiján, provincia de Panamá Oeste. Se trata de un entorno dinámico, caracterizado por cambios constantes en la morfología del terreno debido a las actividades de extracción y movimiento de material pétreo. Estas condiciones implican que los puntos de control terrestre (GCPs) pueden verse afectados o desplazados con el tiempo, por lo que requieren procesos de verificación y actualización periódica para garantizar la precisión de los levantamientos. Esta condición genera un desafío adicional para la obtención de inventarios volumétricos precisos y consistentes en el tiempo.

Durante el desarrollo del proyecto se empleó el dron DJI Mavic 3 Enterprise para la captura de datos fotogramétricos, complementado con una red de puntos de control terrestre establecidos mediante tecnología GNSS. No obstante, se evidenciaron dificultades relacionadas con la estabilidad de los GCPs, incluyendo la pérdida de uno de los puntos y desplazamientos en otros debido a las actividades operativas de la cantera. Estos desplazamientos inciden directamente en la exactitud del modelo fotogramétrico generado, pudiendo provocar variaciones en los cálculos de volumen y, en consecuencia, afectar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Esta situación puso de manifiesto una problemática técnica relevante: en entornos dinámicos, la estabilidad de la red de control puede verse comprometida, afectando potencialmente la exactitud absoluta del modelo fotogramétrico y, en consecuencia, la confiabilidad de los cálculos volumétricos. Ante esta condición, se hace necesaria la implementación de protocolos de control geométrico continuo que permitan verificar, ajustar y garantizar la estabilidad de los puntos de control terrestre a lo largo del tiempo, asegurando así la calidad de los productos generados.

En este contexto, el problema central de la investigación se orienta a evaluar la aplicación de la fotogrametría con drones en inventarios volumétricos dentro de una cantera activa, analizando los retos asociados a la estabilidad de los puntos de control terrestre, la precisión de los productos generados, particularmente en la generación de modelos tridimensionales y análisis volumétricos, y la confiabilidad de los resultados para la gestión topográfica moderna.

## 1.2. Justificación

La topografía contemporánea enfrenta el desafío de integrar tecnologías emergentes que optimicen la captura, procesamiento y análisis de información geoespacial en entornos dinámicos. En particular, los inventarios volumétricos en canteras constituyen una actividad estratégica, ya que de ellos dependen la planificación de la producción, la estimación de costos operativos y el control de recursos extraídos. En este contexto, resulta fundamental considerar tanto la precisión relativa, asociada a la consistencia interna del modelo, como la precisión absoluta, relacionada con su correcta georreferenciación en el espacio, ya que ambas influyen directamente en la confiabilidad de los inventarios volumétricos.

La presente investigación se justifica desde una perspectiva tecnológica y profesional, al evaluar la aplicación de la fotogrametría aérea mediante el uso del DJI Mavic 3 Enterprise como herramienta de apoyo para levantamientos topográficos en minería. La incorporación de esta tecnología permite ampliar la cobertura espacial, reducir la exposición del personal a zonas de riesgo y optimizar los tiempos de captura de datos, representando un avance significativo en el ejercicio profesional del ingeniero en Topografía y Geodesia.

Asimismo, el estudio resalta la necesidad de establecer protocolos rigurosos de control y verificación de los puntos de control terrestre (GCP) en entornos sujetos a modificaciones constantes. La experiencia desarrollada en la cantera de Rock Industries, S.A. evidenció que la estabilidad de la red de control es un factor determinante para garantizar la exactitud absoluta del modelo fotogramétrico y la confiabilidad de los cálculos volumétricos. En este sentido, la inestabilidad o desplazamiento de los GCP puede generar errores acumulativos en la construcción de los modelos tridimensionales, afectando progresivamente la precisión global del levantamiento y la consistencia de los resultados obtenidos.

Finalmente, el desarrollo de inventarios volumétricos precisos favorece una gestión empresarial más eficiente y responsable, al facilitar la toma de decisiones basadas en datos confiables, tanto en términos productivos como ambientales. En este sentido, la disponibilidad de información geoespacial precisa y actualizada permite a las empresas optimizar sus procesos operativos y estratégicos, reduciendo la incertidumbre y mejorando la planificación en entornos dinámicos.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Evaluar la aplicación de la fotogrametría con drones, mediante el uso del DJI Mavic 3 Enterprise, en la generación de modelos tridimensionales y análisis volumétricos en la cantera Rock Industries, S.A., considerando la precisión del levantamiento y la estabilidad de los puntos de control terrestre (GCPs) obtenidos con tecnología GNSS.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Describir las características técnicas y capacidades operativas del DJI Mavic 3 Enterprise, resaltando su idoneidad para trabajos de topografía y geodesia en proyectos de movimiento de tierra.
- Establecer y georreferenciar puntos de control terrestre (GCPs) mediante estación GNSS, asegurando la confiabilidad geométrica del modelo fotogramétrico.
- Ejecutar el vuelo fotogramétrico en el área de estudio, definiendo parámetros óptimos de altura, velocidad y superposición longitudinal y transversal de imágenes.
- Procesar las imágenes capturadas en el *software* Agisoft Metashape, obteniendo ortomosaicos, nubes de puntos densas y modelos digitales de superficie (MDS).
- Comparar las coordenadas iniciales y actualizadas de los puntos de control, identificando posibles desplazamientos o pérdidas y analizando su impacto en la precisión del levantamiento.
- Evaluar y cuantificar la precisión posicional y volumétrica obtenida en el modelo fotogramétrico, mediante el análisis del Error Cuadrático Medio (RMSE) y la desviación estándar.
- Realizar cálculos de inventario volumétrico a partir del modelo digital generado, destacando la importancia de los ajustes y controles adicionales en zonas con alto movimiento de material.
- Analizar la aplicabilidad y ventajas del uso de drones en la topografía moderna como herramienta tecnológica para optimizar tiempos, costos y precisión en proyectos mineros.
- Implementar y analizar procedimientos de control de calidad fotogramétrico (QA/QC), orientados a la verificación y validación de los datos obtenidos, con el fin de garantizar la precisión y confiabilidad de los productos generados.

## 1.4. Alcances y limitaciones

### 1.4.1. Alcances

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la cantera Rock Industries, S.A., durante el período comprendido entre el 3 de marzo de 2025 y el 10 de junio de 2025. El estudio se centró en la aplicación de técnicas de fotogrametría aérea mediante el uso del DJI Mavic 3 Enterprise, con el objetivo de generar productos cartográficos de alta resolución.

Cabe destacar que la investigación se enfoca exclusivamente en la aplicación de esta tecnología, sin incluir la evaluación comparativa con otros métodos de captura de datos como LiDAR, PPK u otras técnicas avanzadas de levantamiento geoespacial.

Entre los productos obtenidos se incluyen ortomosaicos, nubes de puntos densas, modelos digitales de superficie (MDS) y cálculos volumétricos, todos georreferenciados mediante una red de puntos de control terrestre (GCP) distribuidos estratégicamente en el área de estudio.

Inicialmente, se establecieron siete puntos de control en la cantera. Sin embargo, el 26 de mayo de 2025 se detectó la pérdida del Punto 1, el cual había sido materializado con un clavo metálico en el área de tanques de combustible. Debido al alto tránsito de camiones y maquinaria pesada en esta zona, la marca fue removida accidentalmente.

Esta situación motivó un proceso de verificación integral de los GCP, realizándose el replanteo del Punto 1 el 1 de junio de 2025 mediante tecnología GNSS. Durante dicho procedimiento se identificó que no solo se había perdido el Punto 1, sino que los demás puntos presentaban ligeros desplazamientos asociados a las continuas actividades de movimiento de tierra propias de la explotación minera.

Finalmente, el alcance del presente estudio se limita estrictamente al proceso técnico de adquisición de datos, control geométrico y procesamiento fotogramétrico dentro de los límites espaciales de la cantera analizada. No se incluyeron análisis multitemporales, comparaciones sistemáticas con métodos topográficos convencionales ni estudios económicos detallados de rentabilidad. Asimismo, no se contempló la evaluación de errores multitemporales ni el análisis formal de la incertidumbre volumétrica, por lo que los resultados obtenidos corresponden a condiciones específicas del levantamiento realizado.

#### 1.4.2. Limitaciones

Entre las principales limitaciones identificadas durante el desarrollo del proyecto se destaca la pérdida del Punto 1 de control, incidente ocurrido el 26 de mayo de 2025, debido al constante tránsito de vehículos en el área de tanques de combustible. Esta situación evidenció la vulnerabilidad de ciertos métodos de materialización superficial en zonas de alta actividad operativa y subraya la necesidad de implementar soluciones más robustas y redundantes para garantizar la estabilidad del control geodésico. No obstante, esta limitación fue mitigada mediante el replanteo del punto utilizando tecnología GNSS, permitiendo restituir su posición y mantener la continuidad y confiabilidad del control geométrico del levantamiento.

Asimismo, durante el replanteo realizado el 1 de junio de 2025 mediante tecnología GNSS, se verificó que los puntos de control restantes habían experimentado desplazamientos atribuibles al movimiento continuo de tierra en la cantera. Esta condición representa una limitación inherente al trabajo en entornos mineros activos, donde las superficies son dinámicas y susceptibles a modificaciones constantes, lo que puede comprometer temporalmente la estabilidad geométrica del levantamiento.

A estas restricciones se suman factores ambientales como nubosidad, variaciones en la iluminación y ráfagas de viento, los cuales influyeron en la planificación y ejecución de los vuelos fotogramétricos. Estas condiciones pueden afectar la consistencia radiométrica de las imágenes, la calidad de la reconstrucción tridimensional y la estabilidad de la trayectoria del dron, repercutiendo en la superposición y nitidez de las fotografías capturadas.

Adicionalmente, existen limitaciones inherentes a la fotogrametría frente a tecnologías más avanzadas como el LiDAR. A diferencia de este sistema, la fotogrametría no posee capacidad de penetración en cobertura vegetal densa, lo que restringe la generación de modelos digitales del terreno (MDT) en áreas con vegetación. Asimismo, puede presentar menor exactitud en superficies verticales, taludes lisos o estructuras con baja textura, generando oclusiones o pérdida de detalle en la nube de puntos. Mientras que el LiDAR permite capturar geometría con independencia parcial de las condiciones de iluminación, la fotogrametría depende directamente de la calidad visual y del contraste presente en las imágenes, lo cual constituye una limitación técnica relativa en escenarios topográficos complejos.

### 1.5. Metodología general

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, orientado a la resolución de un problema real en el campo de la topografía mediante la implementación de tecnologías emergentes, específicamente el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en inventarios volumétricos.

La metodología integra técnicas de levantamiento GNSS con procedimientos de fotogrametría digital, con el propósito de garantizar precisión geométrica, confiabilidad en los resultados y control de calidad en cada etapa del proceso.

El desarrollo metodológico se estructuró en las siguientes fases principales:

- Revisión bibliográfica y teórica

Se realizó un análisis de literatura científica, normativa técnica y documentación especializada relacionada con topografía, fotogrametría aérea y aplicación de drones en levantamientos volumétricos. Esta fase permitió fundamentar teóricamente el estudio, definir conceptos clave y establecer criterios técnicos para el diseño del levantamiento.

- Definición del área de estudio y recopilación de información preliminar

El área seleccionada corresponde a la cantera Rock Industries, S.A., ubicada en Burunga, provincia de Panamá Oeste. En esta etapa se recopilaron antecedentes sobre la dinámica operativa de la cantera, características morfológicas del terreno y condiciones ambientales que influyen en la planificación de vuelos fotogramétricos.

- Diseño del levantamiento fotogramétrico

Se establecieron los parámetros técnicos del vuelo utilizando el dron DJI Mavic 3 Enterprise, definiendo altura de vuelo, velocidad de desplazamiento y porcentajes de superposición longitudinal y lateral.

Asimismo, se planificó la distribución estratégica de los puntos de control terrestre (GCPs), los cuales fueron levantados mediante tecnología GNSS para garantizar precisión métrica en la georreferenciación del modelo.

- Trabajo de campo

Se ejecutaron los vuelos fotogramétricos conforme a la planificación establecida y se materializaron los puntos de control terrestre. Durante esta fase se detectó la pérdida de un punto de control y el desplazamiento de otros, situación que motivó la actualización completa de la red de GCPs y la incorporación de dos puntos auxiliares adicionales para reforzar la estabilidad geométrica del levantamiento.

- Procesamiento fotogramétrico

Los datos capturados fueron procesados en el *software* Agisoft Metashape, donde se realizó el alineamiento de imágenes, generación de nube de puntos densa, construcción de modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT) y elaboración de ortomosaicos georreferenciados.

- Cálculo de volúmenes y análisis de resultados

A partir de los productos generados, se efectuaron cálculos volumétricos del material presente en la cantera. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los datos GNSS y sometidos a análisis estadístico para evaluar la precisión posicional y volumétrica del modelo.

- Discusión y conclusiones

Finalmente, se interpretaron los resultados en función de los objetivos planteados, analizando las ventajas, limitaciones y desafíos asociados al uso de drones en inventarios volumétricos en entornos mineros activos. Con base en ello, se formularon conclusiones y recomendaciones técnicas para futuras aplicaciones en la topografía moderna.

#### 1.5.1. Revisión bibliográfica y análisis documental

La revisión bibliográfica permitió fundamentar teóricamente la aplicación de drones y técnicas fotogramétricas en topografía y geodesia. Mediante el análisis de literatura científica y normativa técnica se identificaron los principales avances, aplicaciones y limitaciones de estas tecnologías en levantamientos y monitoreo de canteras.

#### **Fotogrametría digital y uso de drones en topografía**

La fotogrametría digital mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha optimizado los levantamientos topográficos al reducir tiempos y costos, además de permitir la generación de modelos tridimensionales y ortomosaicos de alta resolución (ISPRS, 2023). Según Turner y Lucieer (2022), esta tecnología ofrece precisión centimétrica y mayor eficiencia en la obtención y análisis de información espacial, favoreciendo su aplicación en minería, agricultura, planificación urbana y gestión ambiental.

#### **Puntos de control terrestre (GCP) y precisión fotogramétrica**

Los GCP son referencias geospaciales utilizadas para georreferenciar y ajustar modelos fotogramétricos, mejorando su precisión. Franco et al. (2021) señalan que una cantidad insuficiente o una distribución inadecuada de estos puntos puede afectar la exactitud de superficies y cálculos volumétricos.

#### **Aplicación en minería y canteras**

Diversos estudios (Martínez et al., 2018; Ortega, 2020) destacan el uso de drones en minería para el cálculo volumétrico y la caracterización del terreno. Su implementación reduce los tiempos de levantamiento, mejora la seguridad operativa y aumenta la precisión de los inventarios de material, consolidándose como una herramienta ampliamente utilizada en la gestión minera.

### 1.5.2. Planificación del proyecto y diseño del levantamiento

La planificación del proyecto constituyó una fase clave para establecer los criterios técnicos, operativos y logísticos del levantamiento topográfico con UAS, garantizando precisión, eficiencia y confiabilidad en la ejecución del vuelo y la georreferenciación de los productos.

Se definieron como objetivos la generación de un Modelo Digital de Superficie (MDS) y ortomosaicos de alta resolución para el cálculo volumétrico en la cantera Rock Industries, S.A., ubicada en Arraiján, Panamá Oeste.

Para la adquisición de datos se utilizó el dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal, seleccionado por su alta resolución, estabilidad y capacidad de vuelo automatizado. La integración con puntos de control terrestre (GCP) levantados mediante GNSS permitió mejorar la precisión absoluta del modelo.

El diseño del levantamiento consideró una altura de vuelo de 50 m, con un GSD aproximado de 1.5 a 2.0 cm/píxel, y una superposición del 80 % longitudinal y 70 % lateral, asegurando una adecuada cobertura para el procesamiento fotogramétrico.

Se estableció una distribución estratégica de siete GCPs}; sin embargo, debido a la dinámica de la cantera, fue necesario replantear puntos y añadir dos adicionales, garantizando la estabilidad y confiabilidad geométrica del proyecto.

Asimismo, se evaluaron condiciones ambientales (viento, iluminación y horario) y aspectos normativos de operación. Finalmente, se definió un plan logístico que incluyó control del equipo, respaldo de datos y coordinación con el personal en campo para asegurar operaciones seguras.

En síntesis, esta fase permitió estructurar un levantamiento eficiente, cumpliendo con los estándares de precisión requeridos para inventarios volumétricos en canteras.

## Diagrama de flujo de la planificación del levantamiento fotogramétrico



Fig. No.1. Diagrama de flujo planificación del levantamiento fotogramétrico

### 1.5.3 Captura de datos aéreos

La captura de datos aéreos constituyó la fase operativa del levantamiento fotogramétrico, ejecutándose vuelos con el dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal conforme al plan de misión, cumpliendo los parámetros de altura, superposición y cobertura.

Los vuelos se realizaron en modo automatizado, garantizando trayectorias regulares y adecuada redundancia de imágenes. Cada misión fue supervisada en tiempo real, controlando variables como batería, señal GNSS y condiciones de viento.

Se aplicaron protocolos de seguridad conforme a la normativa vigente, incluyendo delimitación del área de operación, coordinación con el personal en campo e inspección previa del equipo.

Como resultado, se obtuvo un conjunto de imágenes de alta resolución, georreferenciadas y con suficiente solapamiento, aptas para el procesamiento fotogramétrico.

#### 1.5.4. Procesamiento fotogramétrico

Las imágenes aéreas fueron procesadas en Agisoft Metashape para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE) y productos cartográficos georreferenciados.

El proceso incluyó el alineamiento de imágenes mediante técnicas SfM y la incorporación de puntos de control terrestre (GCPs) obtenidos con GNSS, mejorando la precisión geométrica del modelo. Posteriormente, se generó una nube de puntos densa utilizada para la construcción del MDE.

Finalmente, se elaboró un ortomosaico georreferenciado de alta resolución, proporcionando una representación precisa del área de estudio. Este proceso permitió obtener información tridimensional confiable para el análisis volumétrico.

#### 1.5.5 Análisis volumétrico

El análisis volumétrico se realizó a partir de los modelos digitales generados, utilizando herramientas de cálculo del *software* fotogramétrico. El procedimiento consistió en delimitar las áreas de interés dentro de la cantera y definir superficies base para la estimación de volúmenes.

El cálculo se efectuó mediante la comparación de superficies, empleando el Modelo Digital de Superficie (MDS) y modelos de referencia, lo que permitió determinar el material acumulado y extraído a partir de las variaciones altimétricas.

Se generaron además productos complementarios como mapas de elevación, curvas de nivel, perfiles topográficos y reportes técnicos, facilitando la interpretación y aplicación de los resultados.

El análisis evidenció que la fotogrametría con drones es una herramienta eficiente y confiable para el control de inventarios y la planificación en entornos mineros dinámicos.

#### 1.5.6. Validación y control de calidad

La validación de resultados permitió evaluar la precisión y confiabilidad de la metodología, mediante la comparación de los productos fotogramétricos con mediciones GNSS en campo y datos de levantamientos previos.

Se analizaron desviaciones planimétricas y altimétricas para verificar la consistencia del Modelo Digital de Elevación (MDE), así como los errores residuales de los puntos de control terrestre (GCPs) durante el procesamiento.

Adicionalmente, se aplicaron controles de calidad en todas las etapas, desde la captura de imágenes hasta la revisión del MDE y ortomosaico, garantizando la correcta georreferenciación y la integridad de los datos.

En conjunto, los resultados confirmaron que la metodología cumple con los estándares de precisión requeridos para inventarios volumétricos en entornos mineros.

#### 1.5.7. Implementación de protocolos de seguridad operacional

El proyecto se ejecutó bajo protocolos de seguridad operacional aplicados en todas las fases del levantamiento, con el fin de garantizar la protección del personal, la integridad del equipo y la continuidad de las operaciones.

Previo a cada vuelo, se realizó la inspección del dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal, verificando su estado general, baterías y sistema de posicionamiento. Asimismo, se estableció una zona segura de operación y se coordinó con el personal de la cantera para evitar interferencias.

Las operaciones se desarrollaron conforme a la normativa de la Autoridad Aeronáutica Civil de Panamá, cumpliendo con los requisitos establecidos para el uso de drones.

La aplicación de estos protocolos permitió ejecutar el levantamiento de forma segura y sin incidentes en un entorno industrial dinámico.

#### 1.5.8. Análisis y discusión de resultados

En esta etapa se realizó un análisis integral de los resultados obtenidos del procesamiento fotogramétrico y del cálculo volumétrico basado en el Modelo Digital de Elevación (MDE), con el fin de evaluar la precisión y viabilidad de la metodología aplicada.

Los volúmenes obtenidos fueron comparados con datos GNSS y antecedentes históricos, evidenciando una adecuada concordancia y validando la confiabilidad del uso de drones como complemento a métodos tradicionales.

Se identificaron ventajas como la rapidez en la captura de datos, reducción del tiempo en campo, generación de información tridimensional detallada y disminución de riesgos operacionales. El uso del dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal resultó adecuado para entornos dinámicos como la cantera.

No obstante, se reconocieron limitaciones, como la dependencia de condiciones climáticas, la necesidad de mantener GCP estables y la exigencia de un procesamiento riguroso para evitar errores. La experiencia en campo evidenció la importancia de un control continuo de estos puntos.

Finalmente, se concluye que la metodología es eficiente, precisa y viable para inventarios volumétricos, siempre que se implemente con una adecuada planificación, control de calidad y cumplimiento normativo.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

## Capítulo II. Marco Teórico

### 2.1. Conceptos básicos de topografía y geodesia

La topografía y la geodesia constituyen disciplinas fundamentales dentro de la ingeniería y las ciencias de la Tierra, encargadas de la medición, representación y análisis de la superficie terrestre. Ambas ciencias se complementan entre sí, aunque difieren en su alcance espacial, nivel de precisión y marco de referencia.

Mientras la topografía se enfoca en la medición detallada de áreas relativamente pequeñas, considerando la superficie terrestre como plana para efectos prácticos, la geodesia aborda el estudio de la Tierra en su conjunto, teniendo en cuenta su curvatura, dimensiones reales, forma geométrica y comportamiento gravitacional. En conjunto, estas disciplinas proporcionan la base geométrica y espacial necesaria para el desarrollo de proyectos de ingeniería, infraestructura, minería y gestión territorial.

#### 2.1.1. Topografía

La topografía es la ciencia que estudia y representa detalladamente las características geométricas del terreno, permitiendo determinar coordenadas planimétricas (X, Y) y altimétricas (Z). En levantamientos realizados en canteras, donde predominan superficies irregulares, taludes pronunciados y cambios constantes en la morfología, la topografía constituye la base geométrica indispensable para garantizar la precisión de los modelos tridimensionales generados mediante técnicas de fotogrametría aérea.

Como se establece en la literatura técnica, “la topografía proporciona la estructura métrica indispensable para asegurar que los modelos 3D y los cálculos volumétricos sean confiables”. En este sentido, su aplicación resulta fundamental para la correcta interpretación y análisis de los datos obtenidos, especialmente en proyectos donde se requiere alta precisión en la determinación de volúmenes y superficies.

### 2.1.2. Geodesia

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, estableciendo sistemas de referencia para el posicionamiento preciso de puntos.

En esta investigación, su papel es fundamental para la correcta georreferenciación del modelo fotogramétrico mediante el uso de puntos de control terrestre (GCPs). Se emplea el sistema geodésico WGS84 junto con la proyección UTM, permitiendo integrar datos GNSS con los productos generados en Agisoft Metashape.

De este modo, la geodesia garantiza la coherencia espacial y la confiabilidad geométrica de los modelos tridimensionales.

### 2.1.3. Relación entre topografía y geodesia

En la fotogrametría aplicada a levantamientos volumétricos, la integración entre topografía y geodesia es fundamental para garantizar la calidad geométrica de los modelos.

La topografía aporta la precisión relativa, asegurando la correcta representación de distancias y relaciones geométricas dentro del modelo. Por su parte, la geodesia proporciona la precisión absoluta, permitiendo ubicar el modelo en un sistema de referencia global mediante coordenadas UTM (WGS84) y el uso de puntos de control terrestre (GCPs) obtenidos con GNSS.

Esta integración permite generar modelos tridimensionales coherentes y correctamente georreferenciados, representando fielmente la realidad del área de estudio.

### 2.1.4. Instrumentación básica

La evolución tecnológica ha permitido complementar la instrumentación topográfica tradicional con sistemas aéreos no tripulados, ampliando las capacidades de levantamiento y análisis.

Los métodos clásicos, como estación total, niveles y GNSS, siguen siendo fundamentales, pero actualmente se integran con UAS equipados con cámaras fotogramétricas y software como Agisoft Metashape.

A continuación, se presenta una comparación general:

Tabla 1. Comparación general en levantamientos

| <b>Método</b>          | <b>Ventajas</b>                                       | <b>Limitaciones</b>                                                     |
|------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Estación total         | Alta precisión local                                  | Proceso más lento y exposición a riesgos en taludes o zonas inestables  |
| GNSS RTK               | Precisión absoluta en tiempo real                     | Sensible a obstrucciones, interferencias y cobertura satelital limitada |
| Fotogrametría con dron | Cobertura rápida, generación de modelos 3D detallados | Dependencia de GCPs y de condiciones adecuadas de iluminación           |

En esta investigación, la fotogrametría con dron permitió obtener modelos tridimensionales de forma eficiente, mientras que el GNSS aseguró la georreferenciación. La combinación de ambas tecnologías optimiza la precisión y productividad en levantamientos volumétricos.

#### 2.1.5. Importancia en la investigación

En proyectos de explotación minera, la topografía y la geodesia son fundamentales, ya que proporcionan la base para la toma de decisiones técnicas y operativas. Su aplicación permite:

- Controlar volúmenes de material.
- Planificar labores de excavación y transporte.
- Generar productos cartográficos como ortomosaicos, MDS, MDE y curvas de nivel.
- Integrar datos en software de modelado y análisis volumétrico.

En la cantera Rock Industries, S.A., su aplicación conjunta permitió desarrollar una metodología confiable, integrando GNSS (WGS84) y fotogrametría con drones.

Así, ambas disciplinas constituyen el soporte técnico de la investigación, garantizando la precisión, coherencia espacial y confiabilidad de los resultados.

## 2.2. Introducción a la fotogrametría aérea

La fotogrametría aérea es una técnica de levantamiento indirecto que permite obtener información del terreno mediante imágenes captadas desde plataformas aéreas, como drones, transformándolas en modelos tridimensionales precisos.

Su evolución ha pasado de métodos analógicos a procesos digitales automatizados, mejorando la precisión, reduciendo tiempos y ampliando sus aplicaciones.

Actualmente, el uso de drones como el DJI Mavic 3 Enterprise, junto con software como Agisoft Metashape, permite generar ortomosaicos, modelos digitales (MDE, MDT) y representaciones 3D con alta precisión, optimizando costos y eficiencia frente a métodos tradicionales.

Su aplicación abarca áreas como minería, agricultura de precisión y catastro, consolidándose como una herramienta clave en la gestión del territorio y en el ejercicio profesional de la Topografía y Geodesia.

### 2.2.1 Definición y principios fundamentales

La fotogrametría aérea es una técnica de levantamiento indirecto que permite obtener información métrica del terreno mediante imágenes captadas desde plataformas aéreas. A diferencia de los métodos tradicionales, se basa en la interpretación geométrica de imágenes para reconstruir la forma y posición de los objetos.

Su aplicación en entornos como canteras es especialmente relevante debido a la complejidad del terreno, caracterizado por superficies irregulares y cambios constantes en su morfología. Esta técnica permite obtener información detallada de forma rápida, segura y con amplia cobertura.

El principio fundamental radica en la reconstrucción tridimensional a partir de imágenes superpuestas, identificando puntos homólogos y generando modelos digitales mediante procesos como Structure from Motion (SfM) y ajuste fotogramétrico.

Así, la fotogrametría aérea se consolida como una herramienta eficiente para la generación de modelos 3D y el análisis volumétrico en proyectos de ingeniería y minería.

### 2.2.2. Componentes de un sistema fotogramétrico aéreo

Un sistema fotogramétrico aéreo está compuesto por elementos que trabajan de forma integrada para generar productos geoespaciales precisos. Entre los principales componentes se encuentran:

**Plataforma aérea (dron):**

Medio de captura de imágenes. En este estudio se utilizó el dron DJI Mavic 3 Enterprise, que permite vuelos automatizados con alta estabilidad y precisión.

**Sensor fotográfico:**

Dispositivo encargado de capturar imágenes de alta resolución, necesarias para la reconstrucción tridimensional del terreno.

**Software de procesamiento:**

Herramienta que permite el flujo fotogramétrico, desde la alineación de imágenes hasta la generación de productos finales. Se empleó Agisoft Metashape para la creación de nubes de puntos, modelos digitales y ortomosaicos georreferenciados.

**Puntos de Control Terrestre (GCPs):**

Referencias geodésicas que permiten la correcta georreferenciación del modelo en sistemas como WGS84/UTM, garantizando precisión y coherencia espacial.

### 2.2.3. Tipos de productos generados

La fotogrametría aérea permite generar diversos productos geoespaciales fundamentales para el análisis del terreno y la toma de decisiones:

**Nube de puntos densa:**

Conjunto tridimensional de puntos (X, Y, Z) que representa la geometría del terreno y sirve como base para modelos y análisis volumétricos.

**Modelos Digitales de Superficie (MDS) y del Terreno (MDT):**

El MDS incluye todos los elementos visibles, mientras que el MDT representa el terreno desnudo. Permiten calcular pendientes, perfiles y volúmenes.

**Ortomosaicos:**

Imágenes georreferenciadas y corregidas geométricamente, obtenidas a partir de múltiples fotografías, aptas para mediciones precisas.

**Modelos 3D texturizados:**

Representaciones tridimensionales realistas que integran geometría y textura, útiles para visualización, inspección y análisis volumétrico.

Estos productos son esenciales para el cálculo de volúmenes en minería, permitiendo determinar con alta precisión cortes y rellenos mediante la comparación de superficies.

**2.2.5. Ventajas de la fotogrametría aérea con drones**

La fotogrametría aérea mediante drones (UAV) representa un avance significativo en los levantamientos topográficos, destacándose por:

**Rapidez en la adquisición de datos:**

Permite cubrir grandes áreas en poco tiempo mediante vuelos automatizados.

**Alta resolución espacial:**

Genera imágenes con precisión centimétrica, captando detalles finos del terreno.

**Reducción de costos:**

Disminuye gastos operativos al reemplazar métodos tradicionales y grandes equipos de campo. Equipos como el **DJI Mavic 3 Enterprise** integran múltiples funciones en una sola plataforma.

**Flexibilidad operativa:**

Facilita el trabajo en zonas de difícil acceso o con condiciones de riesgo.

**Actualización constante:**

Permite monitoreos periódicos, mejorando el control y la toma de decisiones.

### 2.2.7. Aplicaciones en la cantera Rock Industries S.A.

En esta investigación, la fotogrametría aérea con drones se aplicó en la cantera Rock Industries S.A. como herramienta principal para el levantamiento y análisis geoespacial del área de explotación.

Sus principales aplicaciones fueron:

#### **Restablecimiento de puntos de control:**

Se realizó un nuevo levantamiento para recuperar y validar la red de control, garantizando la correcta georreferenciación del proyecto.

#### **Generación de ortomosaico:**

Se obtuvo una representación planimétrica actualizada que permitió identificar zonas operativas y frentes de explotación.

#### **Modelo Digital de Elevación (MDE):**

Procesado en Agisoft Metashape, permitió analizar la morfología del terreno y servir de base para estudios técnicos.

#### **Cálculo volumétrico:**

Se determinaron volúmenes de material con mayor precisión, optimizando el control de inventarios y la toma de decisiones.

En conjunto, la fotogrametría con drones demostró ser una herramienta clave que mejora la eficiencia, precisión y alcance de la topografía moderna.

### 2.3.1. Definición y principales sistemas GNSS

El término GNSS engloba todos los sistemas de posicionamiento satelital actualmente operativos a nivel mundial. Entre los principales se encuentran:

- **Global Positioning System (GPS – Estados Unidos):**

Fue el sistema pionero y se encuentra plenamente operativo desde la década de 1990. Es ampliamente utilizado en aplicaciones civiles y militares, y constituye la base de la mayoría de los receptores GNSS comerciales.

- **GLONASS (Rusia):**

Sistema desarrollado por la Federación Rusa, proporciona cobertura global y complementa al GPS, mejorando la disponibilidad de satélites visibles.

- **Galileo (Unión Europea):**

Diseñado con fines principalmente civiles, se caracteriza por ofrecer alta precisión y confiabilidad, siendo un sistema moderno con mejoras tecnológicas respecto a generaciones anteriores.

- **BeiDou (China):**

Sistema de navegación en expansión que actualmente ofrece cobertura global y contribuye a aumentar la redundancia y robustez de las soluciones GNSS.

La combinación simultánea de estos sistemas en receptores multiconstelación permite:

- ❖ Mayor número de satélites observables.
- ❖ Mejor geometría espacial (reducción del DOP).
- ❖ Mayor disponibilidad en zonas con obstáculos parciales.
- ❖ Incremento en la precisión y confiabilidad de las soluciones.

Esta mejora en la geometría satelital y en la disponibilidad de observaciones se traduce directamente en una mayor precisión en la determinación de coordenadas de los Puntos de Control Terrestre (GCP), los cuales son fundamentales para garantizar la correcta georreferenciación y ajuste del modelo fotogramétrico.

### 2.3.2. Principios de funcionamiento

El posicionamiento GNSS se basa en la medición de la pseudodistancia entre los satélites y el receptor en tierra. Cada satélite transmite su posición (efemérides) y el tiempo de emisión de la señal. El receptor calcula el tiempo de viaje de la señal y, al multiplicarlo por la velocidad de la luz, obtiene una distancia aproximada.

Se denomina pseudodistancia porque incluye errores como retrasos atmosféricos, desincronización de relojes y efectos de multitrayectoria. Mediante la intersección de al menos cuatro señales satelitales, se determinan las coordenadas espaciales (X, Y, Z) y la corrección del reloj del receptor.

En topografía, este proceso se complementa con técnicas de corrección diferencial, que permiten reducir errores y alcanzar precisiones centimétricas. Esto resulta fundamental en la medición de Puntos de Control Terrestre (GCP), ya que cualquier error en las coordenadas puede afectar directamente la exactitud del modelo fotogramétrico.

### 2.3.3. Métodos de posicionamiento en topografía

Los sistemas GNSS permiten distintas modalidades de levantamiento según la precisión requerida:

- **RTK (Real Time Kinematic):**

Técnica de posicionamiento diferencial en tiempo real basada en la fase de la portadora. Requiere comunicación entre estación base y receptor móvil, permitiendo obtener precisiones centimétricas de forma inmediata. Es ampliamente utilizada en levantamientos topográficos y medición de GCP.

- **PPK (Post-Processed Kinematic):**

Los datos se registran en campo y se procesan posteriormente. Alcanza precisiones similares al RTK, con la ventaja de no requerir conexión en tiempo real, siendo ideal en zonas sin cobertura.

En esta investigación se emplearon técnicas GNSS de alta precisión (RTK/PPK) para la determinación de los Puntos de Control Terrestre (GCP).

#### 2.3.4. Aplicación de GNSS en topografía y geodesia

Los sistemas GNSS son fundamentales para la determinación precisa de coordenadas en sistemas de referencia oficiales, mejorando la eficiencia y exactitud de los levantamientos topográficos.

Sus principales aplicaciones incluyen:

- **Redes geodésicas de control:** establecimiento de puntos base para proyectos de ingeniería.
- **Replanteo de obras:** ubicación precisa de elementos constructivos en campo.
- **Monitoreo de deformaciones:** detección de desplazamientos del terreno o estructuras.
- **Levantamientos en zonas de difícil acceso:** sin necesidad de intervisibilidad.
- **Georreferenciación fotogramétrica:** posicionamiento correcto de ortomosaicos y modelos digitales.

En canteras activas, el GNSS es clave para la actualización y verificación de los Puntos de Control Terrestre (GCP), garantizando la precisión y continuidad de los levantamientos fotogramétricos.

#### 2.3.5. Caso aplicado en Rock Industries, S.A.

En este estudio, el GNSS fue clave para el establecimiento y actualización de los Puntos de Control Terrestre (GCP) en la cantera Rock Industries, S.A.

Inicialmente se materializaron siete puntos de control; sin embargo, durante la actualización se detectó la pérdida del Punto 1 debido al tránsito de maquinaria pesada. Esto evidenció la vulnerabilidad de los GCP en entornos operativos dinámicos.

Ante esta situación, se realizó un nuevo replanteo mediante GNSS en modo RTK, obteniendo coordenadas con precisión centimétrica. Este proceso permitió:

- Restablecer y verificar los puntos existentes.
- Detectar desplazamientos ocasionados por movimientos de tierra.
- Incorporar dos puntos auxiliares para reforzar la red de control.

El uso de GNSS garantizó la precisión en la georreferenciación del levantamiento fotogramétrico con el dron DJI Mavic 3 Enterprise, asegurando la validez técnica del ortomosaico y del Modelo Digital de Elevación.

#### 2.4.1. Definición de GCP

Los Puntos de Control Terrestre (GCPs Ground Control Points) son puntos físicos materializados en el terreno, claramente identificables en campo y en las imágenes aéreas, cuyas coordenadas han sido determinadas con instrumentos de alta precisión. Esto permite que los GCP no solo sirvan para el ajuste relativo del modelo fotogramétrico, sino que también garanticen su correcta ubicación en términos de precisión absoluta dentro de un sistema de referencia geodésico oficial. Generalmente, estas mediciones se realizan mediante sistemas GNSS en modo diferencial (RTK, PPK o estático) o mediante estaciones totales.

Durante el procesamiento fotogramétrico, los GCPs se utilizan para ajustar y georreferenciar el modelo tridimensional, corrigiendo errores geométricos y garantizando su alineación con el sistema de coordenadas del proyecto.

#### 2.4.2. Funciones principales de los GCPs

Los Puntos de Control Terrestre (GCPs) desempeñan un papel esencial en el levantamiento fotogramétrico al garantizar la precisión geométrica y la confiabilidad de los productos generados. Sus principales funciones son:

**Georreferenciación precisa:** permiten ubicar correctamente los modelos y ortomosaicos dentro de un sistema de coordenadas, siendo fundamental una distribución adecuada para alcanzar altos niveles de precisión.

**Validación y control de calidad:** facilitan la evaluación de errores residuales y la optimización del modelo fotogramétrico durante el procesamiento.

**Monitoreo de cambios:** permiten comparar levantamientos realizados en diferentes periodos para detectar desplazamientos y variaciones volumétricas del terreno.

**Verificación de estabilidad:** ayudan a identificar pérdidas o desplazamientos de puntos de control en entornos dinámicos, como canteras y áreas de explotación minera.

#### 2.4.3. Recomendaciones para su distribución

La distribución espacial de los GCPs influye directamente en la calidad del ajuste fotogramétrico. Diversas guías técnicas, como las recomendaciones de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015), así como manuales técnicos de Pix4Dmapper (2022) y Agisoft Metashape (2021), establecen buenas prácticas para optimizar su colocación:

- Colocarlos de manera homogénea en todo el polígono de estudio, evitando sectores sin control.
- Ubicar puntos en los extremos del área (esquinas y bordes), complementados con puntos interiores para asegurar un adecuado amarre tridimensional.
- Evitar la concentración excesiva en una sola zona, ya que puede generar deformaciones en áreas mal controladas.
- Incluir puntos adicionales en zonas críticas, como pendientes pronunciadas o variaciones abruptas del relieve.
- Ajustar el número de GCPs según el tamaño del polígono y el GSD.
  - ❖ Para áreas  $\leq 10$  ha: 5–8 GCPs suelen ser suficientes.
  - ❖ Para superficies mayores o cuando se requiere alta precisión: aumentar la densidad de puntos.

La Figura No.2. muestra la distribución de los GCP en la cantera, ubicados estratégicamente en bordes, zonas centrales y áreas con variaciones topográficas. Esta disposición permitió mejorar el ajuste geométrico del modelo fotogramétrico y la precisión del ortomosaico y del Modelo Digital de Superficie (MDS).



Fig. No.2. Distribución de los GCPs.

#### 2.4.4. Caso aplicado en Rock Industries, S.A.

En el presente estudio, desarrollado en la cantera Rock Industries, S.A., la implementación y control de los Puntos de Control Terrestre (GCPs) desempeñó un papel fundamental en la confiabilidad del levantamiento fotogramétrico.

Inicialmente, se establecieron siete (7) puntos de control distribuidos dentro del área efectiva de trabajo (aproximadamente 7 ha). Sin embargo, durante la etapa de actualización del levantamiento se constató la pérdida del Punto 1, el cual había sido ubicado en una zona de alta circulación de maquinaria y vehículos pesados, específicamente en el sector próximo a los tanques de combustible.

Asimismo, durante el replanteo mediante estación GNSS en modo diferencial, se detectaron ligeros desplazamientos en los demás puntos de control, atribuibles al constante movimiento de tierra propio de las operaciones de explotación minera, lo que hizo necesario realizar el replanteo y verificación de dichos puntos en campo.

Con el fin de garantizar la estabilidad geométrica del modelo y la confiabilidad de los resultados, se adoptaron las siguientes medidas:

- Restablecimiento y verificación de las coordenadas de todos los puntos de control existentes.
- Incorporación de dos (2) puntos auxiliares adicionales, fortaleciendo la red de control y mejorando la distribución espacial dentro del polígono de estudio.

Como resultado de estas acciones correctivas, el levantamiento fotogramétrico realizado con el dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal alcanzó niveles de precisión adecuados para la generación de ortomosaicos y Modelos Digitales de Superficie (MDS), permitiendo realizar cálculos volumétricos confiables para la gestión de inventarios y el monitoreo de la explotación minera.

#### 2.4.5. Importancia en proyectos con movimiento de tierra

La experiencia obtenida en este estudio demuestra que los Puntos de Control Terrestre (GCPs) son fundamentales para garantizar la precisión y estabilidad de los modelos

fotogramétricos en proyectos con cambios constantes en la superficie del terreno, como canteras y explotaciones mineras.

Las actividades de extracción, carga y transporte pueden provocar desplazamientos en los GCPs, generando errores que se transfieren al ortomosaico, al Modelo Digital de Elevación y a los cálculos volumétricos. Diversos estudios destacan la necesidad de verificar y mantener periódicamente la red de control para asegurar la confiabilidad de los resultados.

Por ejemplo, un desplazamiento vertical de 0.05 m en un área de 10,000 m<sup>2</sup> puede producir un error volumétrico aproximado de:

$$V = A \cdot \Delta h = 10,000 \text{ m}^2 \times 0.05 \text{ m} = 500 \text{ m}^3$$

Este ejemplo evidencia la influencia de pequeñas variaciones en los puntos de control sobre la estimación de volúmenes. Por ello, la verificación, mantenimiento y reposición de los GCPs son actividades esenciales para garantizar la calidad de los levantamientos y apoyar la toma de decisiones en proyectos de movimiento de tierra.

## 2.5. Tecnología de drones en topografía

La incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha modernizado los levantamientos topográficos, permitiendo una adquisición de datos más rápida, segura y eficiente. La integración de cámaras de alta resolución y sistemas GNSS con tecnología RTK y PPK ha mejorado significativamente la precisión de los productos generados.

Los drones permiten obtener imágenes de alta superposición para la generación de ortomosaicos, modelos digitales de superficie y cálculos volumétricos mediante fotogrametría digital. En la cantera Rock Industries, S.A., el DJI Mavic 3 Enterprise Thermal facilitó la obtención de información geoespacial confiable para el análisis volumétrico.

Además, esta tecnología contribuye a la seguridad operativa al reducir la exposición del personal en áreas de riesgo, consolidándose como una herramienta eficiente para proyectos de movimiento de tierra.

### 2.5.1. Tipos de drones utilizados en topografía

En topografía, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se clasifican en tres categorías principales según su configuración: drones de ala fija, multirrotor y drones híbridos (VTOL). Cada tipo presenta características específicas que determinan su aplicación según la extensión del área, las condiciones del terreno y el nivel de precisión requerido.

#### ❖ Drones de ala fija

Los drones de ala fija poseen una configuración similar a la de un avión convencional, generando sustentación mediante el desplazamiento horizontal continuo. Esta característica les proporciona alta autonomía y eficiencia, permitiendo cubrir grandes extensiones de terreno en una sola misión.

#### **Ventajas:**

- Alta autonomía de vuelo.
- Amplia cobertura de terreno.
- Eficientes para levantamientos de gran escala.
- Adecuados para cartografía y monitoreo de grandes superficies.

#### **Limitaciones:**

- No permiten vuelo estacionario.
- Requieren espacio para el despegue y aterrizaje.
- Menor maniobrabilidad en áreas reducidas o con obstáculos.

Entre los modelos representativos de esta categoría se encuentran el **senseFly eBee X**, ampliamente utilizado en cartografía y agricultura de precisión, y el **Parrot Disco-Pro AG**, orientado principalmente a aplicaciones agrícolas.

## ❖ Drones multirrotor

Los drones multirrotor son la plataforma más utilizada en topografía de detalle y fotogrametría aérea debido a su capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), vuelo estacionario y alta maniobrabilidad en espacios reducidos.

Su sistema de múltiples rotores les proporciona estabilidad durante el vuelo, lo que garantiza la captura de imágenes con adecuada superposición, requisito esencial para la generación de ortomosaicos y Modelos Digitales de Superficie (MDS).

Estas características los hacen especialmente apropiados para levantamientos en entornos dinámicos y complejos, como canteras activas, donde se requiere precisión operativa y control seguro de trayectoria en presencia de taludes y maquinaria pesada.

### Ventajas principales

- Facilidad de operación en terrenos irregulares.
- Capacidad de vuelo estacionario, esencial para precisión geométrica.
- Alta maniobrabilidad en zonas con obstáculos o desniveles pronunciados.
- Idóneos para inventarios volumétricos y monitoreo periódico.

### Limitaciones

- Autonomía moderada (20–45 minutos, según modelo).
- Menor eficiencia para cubrir grandes extensiones en comparación con drones de ala fija.
- Sensibilidad relativa a vientos fuertes.

Entre los modelos representativos de esta categoría se encuentran el DJI Phantom 4 RTK, el DJI Matrice 300 RTK y el DJI Mavic 3 Enterprise.

En el presente estudio, desarrollado en la cantera Rock Industries, S.A., se seleccionó el dron DJI Mavic 3 Enterprise Thermal debido a que sus características técnicas se ajustaban de manera óptima a los requerimientos del levantamiento fotogramétrico realizado.



Fig. No.3. DJI Mavic 3 Enterprise

#### ❖ Drones híbridos (VTOL – Vertical Take-Off and Landing)

Los drones híbridos, también conocidos como VTOL (Vertical Take-Off and Landing), representan una evolución en los sistemas aéreos no tripulados aplicados a la topografía, al combinar las características de los drones de ala fija y multirrotor en una sola plataforma.

Su principal ventaja es la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente, eliminando la necesidad de pistas. Posteriormente, operan en modo de ala fija, lo que les permite realizar vuelos más eficientes y cubrir mayores extensiones con mayor autonomía.

Esta combinación los convierte en una solución óptima para proyectos topográficos que requieren equilibrio entre cobertura, eficiencia operativa y adaptabilidad en terrenos irregulares o de difícil acceso.

Entre sus principales ventajas se destacan:

- Mayor autonomía en comparación con los drones multirrotor.
- Cobertura de grandes extensiones en un solo vuelo.
- Despegue y aterrizaje vertical sin necesidad de pista.
- Adaptabilidad a terrenos complejos o con limitaciones de espacio.

Sin embargo, también presentan ciertas limitaciones:

- Mayor costo de adquisición.
- Sistemas mecánicos y electrónicos más complejos.
- Requerimientos de mantenimiento más exigentes.

En el ámbito profesional, algunos modelos representativos de esta categoría son el WingtraOne Gen II, ampliamente utilizado en minería y proyectos de ingeniería civil; el Quantum Systems Trinity F90+, reconocido por su alta autonomía y capacidad de integrar sensores LiDAR y multiespectrales; y el Atmos Marlyn, diseñado para levantamientos de precisión en condiciones ambientales exigentes.



Fig. No.4. WingtraOne Gen II

## Cuadro comparativo de los tipos de drones en topografía

Con el fin de sintetizar las principales características técnicas y operativas de los diferentes tipos de drones empleados en topografía, se presenta el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 2. Tipos de drones

| Característica                                | Drones de Ala Fija                             | Drones Multirrotor                                              | Drones Híbridos (VTOL)                                       |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Tipo de despegue y aterrizaje</b>          | Requieren pista o lanzamiento asistido         | Vertical (no requieren pista)                                   | Vertical (no requieren pista)                                |
| <b>Autonomía de vuelo</b>                     | Alta (60 – 120 min)                            | Media-Baja (20 – 45 min)                                        | Alta (60 – 90 min)                                           |
| <b>Cobertura por vuelo</b>                    | Muy amplia                                     | Limitada                                                        | Amplia                                                       |
| <b>Vuelo estacionario (hover)</b>             | No                                             | Sí                                                              | No en modo ala fija                                          |
| <b>Precisión en levantamientos de detalle</b> | Media                                          | Alta                                                            | Alta                                                         |
| <b>Facilidad de operación</b>                 | Media                                          | Alta                                                            | Media                                                        |
| <b>Costo</b>                                  | Medio                                          | Medio                                                           | Alto                                                         |
| <b>Complejidad del sistema</b>                | Media                                          | Baja                                                            | Alta                                                         |
| <b>Aplicaciones ideales</b>                   | Cartografía a gran escala, grandes extensiones | Levantamientos de detalle, inspecciones técnicas, minería local | Proyectos extensos con limitaciones de espacio para despegue |
| <b>Ejemplos representativos</b>               | SenseFly eBee X                                | DJI Mavic 3 Enterprise                                          | WingtraOne Gen II                                            |

Del análisis comparativo se observa que los drones multirrotor destacan en trabajos de precisión y detalle, mientras que los drones de ala fija y los híbridos (VTOL) resultan más eficientes para levantamientos de grandes extensiones. La selección del equipo dependerá directamente de los objetivos técnicos, condiciones del terreno y alcance del proyecto.

## 2.6. DJI Mavic 3 Enterprise

El DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) es un vehículo aéreo no tripulado desarrollado por la empresa DJI (Da-Jiang Innovations), reconocida internacionalmente como uno de los principales fabricantes de drones profesionales y de consumo. La serie Enterprise está orientada a aplicaciones técnicas especializadas, entre ellas la topografía, cartografía, fotogrametría, inspecciones técnicas y gestión de emergencias.

El Mavic 3 Enterprise se caracteriza por su diseño compacto y plegable, lo que facilita su transporte, despliegue y operación en campo. Esta condición representa una ventaja operativa frente a plataformas de mayor tamaño, especialmente en proyectos que requieren movilidad constante o acceso a zonas de difícil ingreso.



Fig. No.5. DJI Mavic 3 Enterprise

A diferencia de modelos de mayor envergadura como la serie Matrice, este equipo integra portabilidad, precisión métrica y sensores avanzados en una plataforma ligera, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para levantamientos topográficos de mediana escala y monitoreos periódicos en entornos dinámicos, como el caso de estudio desarrollado en la cantera Rock Industries, S.A.

### Especificaciones de la aeronave

Tabla 3. Especificaciones del dron Dji Mavic 3 Enterprise

|                                    |                                                |
|------------------------------------|------------------------------------------------|
| Peso (con hélices, sin accesorios) | DJI Mavic 3E: 915 g<br>DJI Mavic 3T/3TA: 920 g |
| Peso máximo de despegue            | DJI Mavic 3E/3T/3TA: 1050 g                    |
|                                    |                                                |

|                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensiones                                             | <p>Plegado (sin hélices): 221 × 96,3 × 90,3 mm (largo × ancho × alto)</p> <p>Desplegado (sin hélices): 347,5 × 283 × 107,7 mm (largo × ancho × alto)</p>                                                                                            |
| Distancia diagonal                                      | 380,1 milímetros                                                                                                                                                                                                                                    |
| Velocidad máxima de ascenso                             | <p>6 m/s (modo normal)</p> <p>8 m/s (modo deportivo)</p>                                                                                                                                                                                            |
| Velocidad máxima de descenso                            | <p>6 m/s (modo normal)</p> <p>6 m/s (modo deportivo)</p>                                                                                                                                                                                            |
| Velocidad máxima de vuelo (a nivel del mar, sin viento) | <p>15 m/s (modo normal)</p> <p>Adelante: 21 m/s, Lateral: 20 m/s, Atrás: 19 m/s (modo deportivo)</p>                                                                                                                                                |
| Resistencia máxima a la velocidad del viento            | 12 m/s                                                                                                                                                                                                                                              |
| Altitud máxima de despegue sobre el nivel del mar       | 6000 m (sin carga útil)                                                                                                                                                                                                                             |
| Tiempo máximo de vuelo (sin viento)                     | <p>45 minutos (con batería de vuelo inteligente DJI Mavic 3 Series y hélices DJI Mavic 3 Enterprise Series)</p> <p>36 minutos (con batería DJI Mavic 3 Enterprise Series (versión EU C1) y hélices de bajo ruido DJI Mavic 3 Enterprise Series)</p> |
| Tiempo máximo de vuelo estacionario (sin viento)        | <p>38 minutos (con batería de vuelo inteligente DJI Mavic 3 Series y hélices DJI Mavic 3 Enterprise Series)</p> <p>30 minutos (con batería DJI Mavic 3 Enterprise Series)</p>                                                                       |

|                                                  |                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                  | (versión EU C1) y hélices de bajo ruido DJI Mavic 3 Enterprise Series)                                                                                                                                                                 |
| Distancia máxima de vuelo                        | 32 km (con batería de vuelo inteligente DJI Mavic 3 Series y hélices DJI Mavic 3 Enterprise Series)<br>24 km (con batería DJI Mavic 3 Enterprise Series (versión EU C1) y hélices de bajo ruido DJI Mavic 3 Enterprise Series)         |
| Ángulo de inclinación máximo                     | 30° (Modo Normal)<br>35° (Modo Deportivo)                                                                                                                                                                                              |
| Velocidad angular máxima                         | 200°/s                                                                                                                                                                                                                                 |
| Sistema global de navegación por satélite (GNSS) | GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS (GLONASS solo es compatible cuando el módulo RTK está habilitado)                                                                                                                                           |
| Precisión de vuelo estacionario                  | Vertical: $\pm 0,1$ m (con sistema de visión); $\pm 0,5$ m (con GNSS); $\pm 0,1$ m (con RTK)<br>Horizontal: $\pm 0,3$ m (con sistema de visión); $\pm 0,5$ m (con sistema de posicionamiento de alta precisión); $\pm 0,1$ m (con RTK) |
| Rango de temperatura de funcionamiento           | -10° a 40° C (14° a 104° F)                                                                                                                                                                                                            |
| Almacenamiento interno                           | N / A                                                                                                                                                                                                                                  |
| Modelo de motor                                  | 2008                                                                                                                                                                                                                                   |
| Modelo de hélice                                 | Hélices 9453F para Enterprise                                                                                                                                                                                                          |
| Faro                                             | Integrado en el avión                                                                                                                                                                                                                  |
| Clase                                            | C2 (UE)                                                                                                                                                                                                                                |

### 2.6.2. Aplicaciones en topografía y fotogrametría

El **DJI Mavic 3 Enterprise** es una herramienta eficiente para aplicaciones topográficas y fotogramétricas que requieren precisión, rapidez y facilidad operativa. Su uso es especialmente adecuado en canteras de pequeña y mediana escala, donde permite realizar levantamientos con alto rendimiento y bajo costo operativo.

Entre sus principales aplicaciones destacan:

- **Levantamientos topográficos:** Generación de MDT, MDS y ortomosaicos georreferenciados con alta precisión.
- **Inventarios volumétricos:** Cálculo de volúmenes mediante modelos 3D y comparación temporal de superficies.
- **Inspección de infraestructuras:** Evaluación segura de estructuras sin exposición a riesgos en campo.
- **Monitoreo ambiental:** Seguimiento de cambios en el terreno y control de condiciones ambientales.

En síntesis, el **DJI Mavic 3 Enterprise** optimiza la captura de datos geospaciales, mejora la eficiencia en campo y fortalece la toma de decisiones técnicas en proyectos topográficos.



Fig. No.6. DJI Mavic 3 en vuelo



Fig. No.7. DJI Mavic 3

## 2.7. Software Agisoft Metashape para procesamiento fotogramétrico

El software Agisoft Metashape es una herramienta especializada en el procesamiento de imágenes para la generación de productos fotogramétricos de alta precisión, ampliamente utilizada en topografía, geodesia y cartografía.

Su principal función es transformar imágenes capturadas por drones en modelos 3D, ortomosaicos y nubes de puntos georreferenciadas, mediante algoritmos de fotogrametría digital y visión por computadora. El software automatiza procesos como la alineación de imágenes, generación de nubes de puntos y construcción de modelos, integrando información geométrica y visual.

Además, permite trabajar con distintos tipos de cámaras y realizar ajustes de calibración, lo que mejora la precisión de los resultados.

Funciones principales:

- Generación de nubes de puntos densas.
- Creación de modelos 3D texturizados.
- Elaboración de ortomosaicos georreferenciados.
- Generación de MDS y MDT para análisis y cálculos volumétricos.
- Integración de GCP para mayor precisión.

En síntesis, Agisoft Metashape es una herramienta clave para el procesamiento fotogramétrico, garantizando resultados precisos y confiables en proyectos topográficos.

## 2.8. Marco normativo para el uso de drones en Panamá

El uso de drones (RPAS/UAS) en Panamá está regulado por la normativa aeronáutica nacional, la cual establece requisitos técnicos, operativos y administrativos para garantizar la seguridad aérea.

En aplicaciones profesionales como topografía y fotogrametría, el cumplimiento de estas normas es obligatorio, ya que asegura la legalidad de las operaciones y la validez de los resultados obtenidos.

### 2.8.1. Marco legal y autoridad competente

En la República de Panamá, la entidad responsable de regular el uso y operación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) es la Autoridad Aeronáutica Civil (AAC). Esta institución es la competente para establecer disposiciones orientadas a la seguridad operacional, el registro de aeronaves, el licenciamiento de operadores y el control del espacio aéreo nacional.

El marco normativo principal que regula las operaciones con RPAS está constituido por la Norma Aeronáutica AAC/DG/DSA/01-2021, aprobada mediante la Resolución N.º 004-2021-NRA-DG-AAC y publicada en la Gaceta Oficial N.º 29276 del 3 de mayo de 2021. Esta normativa establece los requisitos relacionados con:

- El registro obligatorio de las aeronaves no tripuladas.
- El licenciamiento y certificación de los operadores.
- La solicitud de autorizaciones para vuelos específicos.
- El cumplimiento de condiciones técnicas y estándares de seguridad aérea.

En el ámbito profesional de la topografía y la fotogrametría, esta regulación adquiere especial relevancia, ya que establece las condiciones bajo las cuales pueden emplearse drones como herramientas para la adquisición de información geoespacial.

### 2.8.2. Requisitos para la operación de drones

Según la normativa AAC/DG/DSA/01-2021, toda operación profesional con drones en Panamá debe cumplir requisitos establecidos por la Autoridad Aeronáutica Civil (AAC).

En primer lugar, el dron debe estar registrado y contar con un número de identificación visible. Asimismo, el operador debe poseer licencia o certificación que acredite su formación en seguridad operacional y normativa aeronáutica.

En ciertos casos, se requiere autorización previa, especialmente en áreas urbanas, zonas restringidas o cercanas a infraestructuras sensibles, debiendo presentar un plan de vuelo detallado.

Adicionalmente, puede ser necesaria la coordinación con entidades de seguridad del Estado en zonas específicas.

El cumplimiento de estos requisitos garantiza operaciones legales y respalda la validez técnica de los productos obtenidos en proyectos topográficos.

# **CAPÍTULO III**

## **METODOLOGÍA**

## CAPÍTULO III METODOLOGÍA

### 3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la cantera Rock Industries, S.A., ubicada en la República de Panamá. Esta empresa se dedica a la extracción y procesamiento de materiales pétreos como piedra triturada, tosca, polvillo y grava, utilizados en obras civiles e infraestructura vial.



Fig. No.8. Cantera Rock Industries, S.A.

La selección de esta cantera se debe a su actividad continua de explotación, su extensión y la necesidad de realizar cálculos volumétricos precisos para el control operativo y cumplimiento de normativas ambientales y legales.

El área presenta una topografía irregular, con bancos de explotación, taludes y escombreras, lo que dificulta el levantamiento mediante métodos tradicionales debido al acceso limitado y las condiciones de riesgo.

En este contexto, la fotogrametría con drones se implementó como una alternativa eficiente para la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) y de Superficie (MDS), utilizados en el análisis volumétrico de material.

Para garantizar la precisión del levantamiento, se estableció una red de siete Puntos de Control Terrestre (GCPs), medidos con GNSS de alta precisión y distribuidos estratégicamente en el área de estudio.

En síntesis, la cantera constituye un entorno adecuado para la aplicación de tecnologías geoespaciales modernas, demostrando la utilidad de la fotogrametría con drones en la gestión técnica de operaciones mineras.

### 3.1.1. Localización geográfica de la cantera Rock Industries S.A.

La cantera Rock Industries S.A. se encuentra ubicada en la provincia de Panamá Oeste, específicamente en el sector del Bosque Protector de Arraiján, en Calle Macías, corregimiento de Burunga, distrito de Arraiján. Esta localización corresponde a una zona estratégica



Fig. No.9. Cantera Rock Industries S.A. vista desde Google maps.

caracterizada por la coexistencia de áreas de reserva natural con superficies destinadas a la explotación de recursos minerales no metálicos.

Su posición geográfica le confiere ventajas logísticas significativas, debido a su proximidad a la Ciudad de Panamá y a importantes corredores viales de la región metropolitana. Esta condición facilita el transporte de los materiales extraídos hacia diversos proyectos de infraestructura, optimizando la distribución de agregados pétreos tanto en el área urbana como en el interior del país. Asimismo, la accesibilidad vial permite la movilización eficiente de maquinaria pesada, personal técnico y productos procesados, garantizando la continuidad operativa de las actividades extractivas.



Fig. No.10. Roca madre, Cantera Rock Industries

Desde el punto de vista geomorfológico, la cantera se emplaza sobre un terreno de relieve variado, donde se distinguen superficies intervenidas por la actividad minera, zonas de acopio de material y áreas con cobertura

vegetal correspondientes al entorno del bosque protector. Este contraste entre ecosistema

natural y actividad extractiva evidencia la necesidad de contar con información geoespacial actualizada y de alta precisión, orientada al control técnico de la explotación y al monitoreo del impacto ambiental.

En el marco del presente estudio, la localización de la cantera fue georreferenciada mediante técnicas GNSS de alta precisión, lo que permitió establecer con exactitud los puntos de control terrestre (Ground Control Points – GCPs) utilizados en la planificación y ejecución del levantamiento fotogramétrico con drones. Estos puntos garantizaron la calidad métrica de los productos cartográficos generados, tales como ortomosaicos, modelos digitales de elevación y cálculos volumétricos.

La ubicación de la cantera responde no solo a la riqueza geológica del área, sino también a criterios de viabilidad económica y conectividad logística. Su emplazamiento dentro de un área ambientalmente regulada refuerza la importancia de aplicar tecnologías geoespaciales modernas que permitan optimizar la gestión productiva y contribuir al cumplimiento de la normativa ambiental vigente en Panamá.



Fig. No.11. vista Cantera Rock Industries S.A.

### 3.2. Descripción de la empresa LaTAM Drones, Inc.



Fig. No.14. stand de  
LatamDrones  
Expomaquina 2026

La empresa LaTAM Drones, Inc. es una organización especializada en la aplicación de tecnologías aéreas no tripuladas, sensores remotos y sistemas avanzados de procesamiento de datos geoespaciales orientados a distintos sectores productivos y de investigación. Su enfoque principal consiste en ofrecer soluciones innovadoras y de alta precisión mediante el uso de drones de última generación, software especializado en fotogrametría y plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), contribuyendo significativamente al desarrollo de proyectos en minería, construcción, agricultura, gestión ambiental y planificación territorial.

- Origen y misión de la empresa

La empresa surge como respuesta a la creciente demanda de tecnologías modernas de levantamiento y monitoreo geoespacial en Panamá y la región latinoamericana. Su misión es proporcionar servicios integrales de captura, procesamiento y análisis de datos aéreos, generando información confiable que permita a sus clientes optimizar procesos, reducir costos operativos y tomar decisiones estratégicas fundamentadas en datos precisos y verificables.

- Áreas de especialización

- ❖ **LaTAM Drones, Inc.** se ha consolidado como un referente en la implementación de metodologías modernas basadas en aeronaves no tripuladas. Entre sus principales áreas de especialización se destacan:
- ❖ **Fotogrametría aérea con drones**, orientada a la generación de ortomosaicos, Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales del Terreno (MDT) de alta resolución para proyectos de ingeniería y minería.
- ❖ **Inventarios volumétricos**, mediante el cálculo preciso de volúmenes en canteras, rellenos, obras civiles y proyectos de movimiento de tierra.

- ❖ **Inspecciones térmicas con cámaras termográficas**, aplicadas principalmente en plantas de paneles solares, permitiendo detectar puntos calientes, fallas en módulos fotovoltaicos y pérdidas de eficiencia energética mediante análisis radiométrico.
- ❖ **Servicios especializados de mantenimiento aéreo**, como el programa Aereal Wash, orientado a la limpieza con agua a presión mediante drones industriales. Para este servicio se emplea el DJI Matrice 350 RTK, plataforma de grado industrial diseñada para operaciones de alta exigencia técnica.

- Tecnología y equipamiento

LaTAM Drones, Inc. cuenta con una flota de drones profesionales e industriales que le permite ejecutar proyectos de diversa complejidad técnica.

Entre sus equipos destaca el **DJI Mavic 3 Enterprise**, utilizado en este proyecto de tesis, el cual incorpora sistema RTK para posicionamiento de precisión centimétrica, cámara de alta resolución y alta eficiencia para levantamientos fotogramétricos.

También dispone del **DJI Matrice 350 RTK**, una plataforma industrial de alto rendimiento compatible con sensores especializados como cámaras térmicas y equipos para inspecciones técnicas avanzadas.



Fig. No.15. DJI M300 RTK

La empresa incorpora además tecnología de escaneo láser terrestre mediante el **Leica BLK360**, utilizado para captura tridimensional de alta resolución en modelado arquitectónico y documentación de infraestructuras, aunque no fue aplicado en este estudio.

Para el procesamiento de datos se emplea el *software* **Agisoft Metashape**, utilizado en la generación de ortomosaicos, modelos digitales y análisis volumétricos. La integración de estas tecnologías permite ofrecer soluciones geoespaciales de alta precisión bajo estándares internacionales de calidad.

- Relación con la práctica profesional

El presente trabajo de tesis se desarrolló en colaboración directa con LaTAM Drones, Inc., lo que permitió la aplicación práctica de técnicas avanzadas de fotogrametría y procesamiento de imágenes aéreas en la cantera Rock Industries S.A..

Esta experiencia facilitó la integración de los conocimientos teóricos adquiridos durante la carrera de Ingeniería en Topografía y Geodesia con la práctica

profesional en un entorno real de explotación minera, validando el uso de drones como herramienta tecnológica eficiente y precisa para el ejercicio profesional del topógrafo moderno.



Fig. No.16 Pasante en el stand de Latamdrones Expomaquina 2026

### 3.2.2. Rol de la empresa en la presente investigación

LaTAM Drones, Inc. desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de la presente investigación, al proporcionar recursos tecnológicos, asesoría técnica y acompañamiento profesional para la ejecución del levantamiento fotogramétrico en la cantera Rock Industries S.A., ubicada en el distrito de Arraiján, provincia de Panamá Oeste.

Desde la fase inicial, la empresa facilitó la planificación y ejecución de vuelos con el DJI Mavic 3 Enterprise, equipado con sistema GNSS RTK, permitiendo precisión centimétrica en la captura de imágenes. Además, brindó soporte en la definición de parámetros de vuelo como altura, solape, velocidad y configuración de cámara, esenciales para la correcta generación de productos fotogramétricos.

En el control geodésico, participó en el establecimiento de siete (7) puntos de control terrestre (GCPs), medidos con receptores GNSS de alta precisión, los cuales garantizaron la exactitud planimétrica y altimétrica del modelo fotogramétrico.

Durante el procesamiento de datos, la empresa brindó asesoría en el uso de Agisoft Metashape y 3Dsurvey, utilizados para la generación de nubes de puntos, modelos digitales de superficie y terreno (MDS y MDT), ortomosaicos y cálculos volumétricos aplicados a inventarios mineros.

Asimismo, la empresa aportó en la capacitación práctica sobre metodologías de levantamiento con drones, control de calidad de datos geoespaciales y operación de UAV en entornos industriales, fortaleciendo la formación técnica del investigador.

En síntesis, LaTAM Drones, Inc. contribuyó mediante:

- Provisión de tecnología y soporte técnico especializado.
- Asesoría en planificación, ejecución y procesamiento fotogramétrico.
- Implementación y control de puntos GNSS.
- Aseguramiento de la calidad y precisión de los productos generados.
- Transferencia de conocimientos y formación práctica profesional.

De esta forma, la empresa se consolidó como un aliado estratégico, permitiendo la aplicación real de tecnología dron en un entorno productivo y reforzando el aporte técnico del presente estudio en la Ingeniería en Topografía y Geodesia.

### 3.3.1. Metodología para la toma de puntos con GNSS

Para el establecimiento de los Puntos de Control Terrestre (GCPs), se empleó un receptor GNSS geodésico de doble frecuencia (L1/L2), operando bajo la técnica de levantamiento estático rápido. Esta metodología fue seleccionada debido a su capacidad para proporcionar coordenadas con alta precisión planimétrica y altimétrica en tiempos de observación relativamente cortos, siendo adecuada para levantamientos de extensión media como el área de estudio.

Cada punto fue observado durante un tiempo mínimo de cinco (5) minutos, garantizando la suficiente captación de datos satelitales y redundancia geométrica para el posterior ajuste. Durante el levantamiento se verificó la adecuada geometría satelital (PDOP bajo) y la estabilidad del punto, asegurando condiciones óptimas de observación.

Las correcciones diferenciales fueron procesadas a partir de una estación base de referencia con coordenadas conocidas dentro del marco geodésico oficial, permitiendo la compensación de errores asociados a la propagación atmosférica, relojes satelitales y efemérides. Como resultado, se alcanzó una exactitud centimétrica tanto en planimetría como en altimetría, cumpliendo con los estándares requeridos para aplicaciones fotogramétricas de precisión.

Las coordenadas obtenidas fueron posteriormente integradas en el procesamiento fotogramétrico como puntos de control en el software especializado, permitiendo la correcta georreferenciación y ajuste del modelo generado a partir de las imágenes captadas con el DJI Mavic 3 Enterprise. Esto contribuyó significativamente a la reducción de errores sistemáticos y a la mejora del ajuste absoluto del modelo tridimensional.

### 3.3.2. Puntos de control en la cantera de Rock Industries, S.A.

En la cantera Rock Industries S.A., se establecieron inicialmente siete (7) puntos de control terrestre distribuidos estratégicamente dentro del área de estudio. La disposición espacial de los GCPs se diseñó con el objetivo de cubrir homogéneamente los límites perimetrales, las zonas de explotación activa y los niveles superiores de la cantera, garantizando un ajuste geométrico equilibrado del modelo fotogramétrico.



Fig. No.17. Los 7 Puntos de control de la cantera.

La distribución adoptada respondió a criterios técnicos fundamentales en fotogrametría, tales como:

- Cobertura uniforme del área.
- Inclusión de puntos en extremos y esquinas del polígono de estudio.
- Ubicación en superficies estables y de buena visibilidad aérea.
- Evitar alineaciones colineales que pudieran afectar el ajuste geométrico.

Esta configuración permitió optimizar el desempeño de los algoritmos de correlación automática empleados en el software fotogramétrico, reduciendo posibles deformaciones en las ortoimágenes y en los modelos digitales generados.

No obstante, debido a la dinámica operativa de la cantera, caracterizada por movimientos de tierra y tránsito de maquinaria pesada, uno de los puntos de control fue eliminado y otros presentaron desplazamientos respecto a su posición original. Esta situación evidenció la importancia de verificar periódicamente la estabilidad de los puntos de control en áreas de explotación minera.

## Puntos de Control Terrestre (GCPs)

- Punto de Control N°1

El Punto de Control N°1, se encontraba originalmente ubicado en el área de tanques de combustible dentro de las instalaciones de Rock Industries, S.A. ver figura No. 18, sitio correspondiente al extremo noreste de la zona de explotación de la cantera. Este punto había sido marcado mediante un clavo metálico incrustado en el concreto del piso ver figura No. 18, sirviendo como referencia geodésica para los vuelos fotogramétricos realizados inicialmente.



Fig. No.18. punto#1



Fig. No.19. punto#1

Sin embargo, durante la inspección de campo previa al segundo levantamiento, se constató que dicho punto había desaparecido, presumiblemente por causa del alto tránsito de vehículos pesados y maquinaria, habitual en esa área de trabajo. Ante la imposibilidad de recuperar el punto original, fue necesario realizar un replanteo y actualización de las coordenadas utilizando una estación GNSS en modalidad RTK, utilizando un receptor de la marca Satlab, aprovechando la oportunidad para verificar la estabilidad de los demás puntos de control.

El nuevo levantamiento permitió establecer una nueva posición geográfica del PT1, evidenciando un desplazamiento respecto a su ubicación original ver figura No.20,



Fig. No.20. Nuevo punto#1

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT1:

Tabla 4. Comparación de coordenadas del PT1

| Punto             | Norte (m) | Este (m)  | Altitud (m) | $\Delta$ Horizontal (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------------------|-----------|-----------|-------------|-------------------------|----------------|
| PT1 (Original)    | 997326.40 | 643933.33 | 101.269     | —                       | —              |
| PT1 (Actualizado) | 997326.09 | 643933.66 | 100.874     | 0.453                   | -0.395         |

#### Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Aplicando la expresión de distancia euclidiana:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta H = \sqrt{((-0.31)^2 + (0.33)^2)}$$

$$\Delta H = \sqrt{(0.0961 + 0.1089)}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.205}$$

$$\Delta H = 0.4528 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.395 \text{ m}$$

El desplazamiento horizontal total ( $\Delta$ ) fue de 0.453 m, mientras que la variación altimétrica ( $\Delta Z$ ) fue de  $-0.395$  m.

Desde el punto de vista técnico, aunque estos valores puedan parecer reducidos en términos absolutos, resultan significativos en el contexto del control fotogramétrico de alta precisión. Un desplazamiento de esta magnitud puede inducir:

- Desajustes en la georreferenciación absoluta del modelo.
- Inclinaciones leves del bloque fotogramétrico.

- Alteraciones en los cálculos volumétricos.
- Incremento del error RMS durante el ajuste.

En proyectos de monitoreo minero, donde se realizan comparaciones multitemporales para análisis de cambios y cálculo de volúmenes, la estabilidad centimétrica de los GCPs es fundamental para garantizar consistencia espacial entre campañas.

Por esta razón, la actualización de las coordenadas del PT1 fue indispensable para preservar la integridad geométrica del modelo tridimensional y asegurar la confiabilidad de los productos generados.



Fig. No.21. Punto#1 visto desde Google Maps

- El Punto de Control N°2

El Punto de Control N.º 2 (PT2) se encuentra ubicado exactamente en una esquina de la tapa del tanque séptico, situado detrás del área de los baños. Este punto fue materializado con un clavo de acero que marca la posición precisa del centro del punto de control.

Para mejorar su identificación visual durante el vuelo del dron a una altura de 50 metros, se procedió a pintar la esquina con un patrón en forma de cuadro dividido en dos colores contrastantes (blanco y negro). Este diseño facilita la detección del punto en las imágenes aéreas, permitiendo al software fotogramétrico Agisoft Metashape reconocerlo fácilmente durante la etapa de georreferenciación.



Fig. No.22. Punto#2



Fig. No.23. Punto#2 visto desde Google Maps.

Durante la fase de verificación en campo, se comprobó que el punto se mantenía visible, sin embargo, al realizar el replanteo con estación GNSS, se detectó un ligero desplazamiento respecto a sus coordenadas originales. Dicho desplazamiento se atribuye a modificaciones topográficas derivadas de las actividades de excavación y relleno propias del proceso de explotación de material pétreo.

El ajuste de las coordenadas permitió actualizar su posición con precisión centimétrica, asegurando la confiabilidad del control terrestre empleado en el procesamiento fotogramétrico.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT2:

Tabla 5. Comparación de coordenadas del PT2

| <b>Punto</b>      | <b>Norte (m)</b> | <b>Este (m)</b> | <b>Altitud (m)</b> | <b>Δ Horizontal (m)</b> | <b>ΔZ (m)</b> |
|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| PT2 (Original)    | 997318.613       | 643800.147      | 100.883            | —                       | —             |
| PT2 (Actualizado) | 997318.369       | 643800.216      | 99.924             | 0.254                   | -0.959        |

#### Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Aplicando la expresión de distancia euclidiana:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta H = \sqrt{((-0.244)^2 + (0.069)^2)}$$

$$\Delta H = \sqrt{(0.0595 + 0.0048)}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.0643}$$

$$\Delta H = 0.254 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.959 \text{ m}$$

El análisis comparativo evidencia un desplazamiento horizontal de 0.254 m y una variación vertical de -0.959 m.

Desde el punto de vista planimétrico, la diferencia horizontal se mantiene dentro de un rango moderado; sin embargo, la variación altimétrica cercana a un metro resulta significativa y sugiere alteraciones en la superficie circundante.

Este comportamiento es coherente con entornos de explotación minera o canteras, donde los cambios en el relieve son frecuentes debido a:

- Excavaciones progresivas.
- Compactación del terreno.
- Rellenos temporales.
- Vibraciones inducidas por maquinaria pesada.

El desplazamiento identificado confirma la importancia de realizar verificaciones periódicas de los puntos de control en áreas con dinámica topográfica activa. La actualización de sus coordenadas permitió mantener la coherencia del sistema de referencia del proyecto y asegurar la precisión del ajuste fotogramétrico.

Gracias a esta corrección, el PT2 conserva su validez como punto confiable dentro de la red de control terrestre utilizada para el procesamiento y generación de productos cartográficos.

- El Punto de Control N° 3

El Punto de Control N.º 3 se encuentra ubicado sobre el camino de rodadura que conduce hacia la fuente principal de extracción de material, dentro de las instalaciones de Rock Industries, S.A. Se localiza en una zona de alto tránsito vehicular y de maquinaria pesada, y en proximidad al Punto de Control N.º 5, lo que permitió optimizar las labores de replanteo y verificación durante la actualización de coordenadas.



Fig. No.24. Punto#3 visto desde Google Maps.



Fig. No.25. Monumento Punto#3

El punto está materializado mediante un clavo de acero anclado en una base de concreto. Sobre dicha base se aplicó una marcación fotogramétrica tipo damero (blanco y negro), diseñada para mejorar su identificación en las imágenes aéreas captadas durante los vuelos ejecutados a 50 metros de altura con el dron DJI Mavic 3 Enterprise.

Debido a que el área presenta alto tránsito operativo, se colocaron bloques de concreto de color verde alrededor del punto como medida de protección física frente al paso constante de vehículos y maquinaria pesada. Esta disposición preventiva contribuye a preservar su estabilidad, reducir el riesgo de alteraciones físicas y garantizar su permanencia para futuros levantamientos topográficos.



Fig. No.26. tabla punto#3

La actualización de las coordenadas se realizó mediante observaciones con receptor GNSS geodésico, con el propósito de asegurar precisión centimétrica y mantener la coherencia espacial del modelo generado durante el procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape.

Durante la verificación se determinó que el punto presentó un ligero desplazamiento respecto a sus coordenadas originales, atribuible a los movimientos de tierra y a la actividad operativa constante en el área de explotación.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT3:

Tabla 6. Comparación de coordenadas del PT3

| Punto             | Norte (m)  | Este (m)   | Altitud (m) | $\Delta$ Horizontal (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|
| PT3 (Original)    | 997126.439 | 643936.422 | 115.004     | —                       | —              |
| PT3 (Actualizado) | 997126.437 | 643936.356 | 114.941     | 0.066                   | -0.063         |

Cálculo del Desplazamiento Horizontal

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta H = \sqrt{((-0.002)^2 + (0.066)^2)}$$

$$\Delta H = \sqrt{(0.000004 + 0.004356)}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.00436}$$

$$\Delta H = 0.066 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.063 \text{ m}$$

El desplazamiento identificado, aunque leve, evidencia la influencia directa de las condiciones operativas del entorno, especialmente en zonas de alto tránsito. La actualización periódica de estos puntos resulta fundamental para mantener la confiabilidad de la red de control geodésico y garantizar la precisión del modelo fotogramétrico y de los productos cartográficos derivados.

- El Punto de Control N° 4

El Punto de Control N.º 4 se encuentra ubicado en la parte posterior del patio de materiales de la Cantera Rock Industries, S.A., específicamente sobre el camino de acceso que conecta las zonas operativas con el área de extracción. Su posición corresponde al sector suroeste de la cantera, tal como se observa en la imagen satelital Figura 27, donde se identifica mediante un pin amarillo.



Fig. No.27. Punto#4 vista desde Google Maps.



Fig. No.28. Monumento Punto#4

Este punto fue materializado directamente sobre el terreno natural, en una superficie de grava compactada, mediante la instalación de un clavo metálico centrado en el área de observación. Para facilitar su identificación en los productos fotogramétricos, se aplicó una marcación superficial en forma de cuadrado dividido en colores blanco y negro, lo cual permitió su correcta detección en las imágenes aéreas captadas durante los vuelos realizados a una altura de 50 metros con el dron DJI Mavic 3 Enterprise.

El entorno del punto se caracteriza por presentar tránsito constante de camiones y maquinaria pesada destinada al transporte y movimiento de materiales, lo que implica una posible alteración superficial del terreno.

Durante la actualización de la red de control, se efectuó un nuevo replanteo del punto utilizando un receptor GNSS Satlab en modo RTK, con el propósito de verificar su estabilidad y garantizar la coherencia espacial del modelo fotogramétrico procesado en Agisoft Metashape.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT4:

Tabla 7. Comparación de coordenadas del PT4

| <b>Punto</b>      | <b>Norte (m)</b> | <b>Este (m)</b> | <b>Altitud (m)</b> | <b>Δ Horizontal (m)</b> | <b>ΔZ (m)</b> |
|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| PT4 (Original)    | 997025.771       | 643876.633      | 115.004            | —                       | —             |
| PT4 (Actualizado) | 997025.620       | 643876.524      | 114.941            | 0.186                   | -0.120        |

Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Aplicando la expresión de distancia euclidiana:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo:

$$\Delta H = \sqrt{(-0.151)^2 + (-0.109)^2}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.022801 + 0.011881}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.034682}$$

$$\Delta H = 0.186 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.120 \text{ m}$$

A diferencia del Punto N.º 3, este punto muestra una variación mayor, lo cual puede atribuirse a su localización directa sobre una superficie de grava compactada sometida a tránsito constante y operaciones de carga y descarga de material.

El valor obtenido, aunque no compromete significativamente la precisión global del modelo fotogramétrico, evidencia que los puntos establecidos sobre superficies no estabilizadas presentan mayor susceptibilidad a desplazamientos.

Desde el punto de vista técnico, este resultado refuerza la importancia de:

- Ubicar puntos de control en superficies rígidas o estabilizadas.
- Realizar verificaciones periódicas en entornos operativos activos.
- Considerar la naturaleza del terreno en el análisis de estabilidad de la red geodésica

- El Punto de Control N.º5

El Punto de Control N.º 5 se encuentra ubicado sobre el camino principal de rodadura que da acceso a la fuente de material, dentro del área operativa de la Cantera Rock Industries, S.A. Su posición estratégica se localiza muy próxima al Punto de Control N.º 3, formando parte del corredor de tránsito vehicular que conecta la zona de acopio con la planta de trituración, como se observa en la imagen satelital (Figura 29).



Fig. No.29. Punto#5 vista desde Google Maps.



Fig. No.30.  
Monumento  
punto#5

Este punto fue materializado mediante una losa de concreto empotrada en el terreno, pintada en forma de cuadro de color blanco y negro claramente visible. Adicionalmente, se encuentran cuatro bloques de hormigón pintados de color verde que actúan como elementos de protección física y delimitación del vértice, reduciendo la probabilidad de alteración por tránsito de maquinaria pesada.

Desde el punto de vista operativo, el PT5 cumple una función clave en la red de control, ya que permite mantener la coherencia geométrica del acceso principal y fortalecer la vinculación entre los puntos que delimitan el área activa de explotación.

Durante la campaña de actualización de la red de puntos de control —realizada tras la pérdida del Punto N.º 1 (PT1)— se efectuó el replanteo completo de los GCPs utilizando estación GNSS en modo RTK. En dicha verificación se detectaron ligeras variaciones en algunos vértices, atribuibles al constante movimiento de tierra, labores de acarreo y tránsito continuo de maquinaria pesada en la cantera.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT5:

Tabla 8. Comparación de coordenadas del PT5

| Punto             | Norte (m)  | Este (m)   | Altitud (m) | $\Delta$ Horizontal (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|
| PT4 (Original)    | 997051.23  | 643942.695 | 116.429     | —                       | —              |
| PT4 (Actualizado) | 997051.248 | 643942.587 | 116.386     | 0.109                   | -0.043         |

#### Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Se aplica la expresión:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta H = \sqrt{((0.018)^2 + (-0.108)^2)}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.000324 + 0.011664}$$

$$\Delta H = \sqrt{0.011988}$$

$$\Delta H = 0.109 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.043 \text{ m}$$

Aunque el PT5 se encuentra materializado sobre una losa de concreto protegida por bloques de hormigón —condición constructiva que favorece su estabilidad— los resultados del replanteo GNSS evidencian un desplazamiento horizontal mayor en comparación con el PT3.

El PT5 presentó una variación horizontal de 10.9 cm, mientras que el PT3 mostró una variación de 6.6 cm, lo que indica que, dentro de la red evaluada, el PT5 experimentó un mayor ajuste posicional.

- El Punto de Control N.º6

El Punto de Control N.º6 se encuentra materializado en un monumento de concreto ubicado al costado de la puerta de la oficina de operaciones dentro del área administrativa de la cantera. Esta localización fue seleccionada por su accesibilidad y por encontrarse en una zona estable, protegida del tránsito de maquinaria pesada y de la escorrentía superficial, lo que favorece su conservación y estabilidad geométrica.



Fig. No.31. Punto#6 vista desde Google Maps.



Fig. No.32.  
Monumento  
Punto#6

El monumento consiste en un bloque prismático de concreto cuya cara superior presenta una señalización en cuadrantes alternos blanco y negro, característica de puntos topográficos permanentes. En la imagen se observa el proceso de mantenimiento del vértice, mediante la aplicación de pintura para reforzar el contraste visual y garantizar su correcta identificación durante los trabajos de levantamiento y georreferenciación.

El punto se encuentra en buen estado de conservación, correctamente nivelado y claramente visible. La renovación de la pintura permite mantener su funcionalidad como referencia geodésica auxiliar dentro de la red de control establecida en la cantera.

Durante la campaña de control y verificación de precisión se realizó una nueva observación con equipo GNSS de doble frecuencia y procesamiento diferencial.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT6:

Tabla 9. Comparación de coordenadas del PT6

| Punto             | Norte (m)  | Este (m)   | Altitud (m) | $\Delta$ Horizontal (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|
| PT6 (Original)    | 997227.007 | 643905.615 | 104.694     | —                       | —              |
| PT6 (Actualizado) | 997227.021 | 643905.614 | 104.675     | 0.014                   | -0.019         |

#### Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Se aplica la expresión:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta H = \sqrt{((0.014)^2 + (-0.001)^2)}$$

$$\Delta H = \sqrt{(0.000197)}$$

$$\Delta H = 0.014 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0.019 \text{ m}$$

El valor obtenido corresponde a 1.4 cm, mientras que la variación vertical es de 1.9 cm.

Estas diferencias se consideran mínimas y se encuentran dentro de los rangos esperados para observaciones GNSS con procesamiento diferencial. No existe evidencia de desplazamiento físico del monumento; las variaciones registradas se atribuyen principalmente a ajustes instrumentales y a mejoras en el procesamiento de datos.

En comparación con otros puntos de la red, el PT6 se clasifica como uno de los más estables, lo que confirma que su ubicación dentro del área administrativa ofrece condiciones favorables de conservación.

- El Punto de Control N.º 7

El Punto de Control N.º 7 se encuentra materializado en un monumento de concreto de forma cúbica, señalizado con un patrón de cuadrantes alternos en color blanco y negro para facilitar su identificación tanto en campo como en imágenes aéreas.

Este punto está ubicado contiguo al Punto 6, frente a la puerta principal de la oficina de operaciones dentro de la Cantera Rock Industries, S.A. Su emplazamiento corresponde a una zona estable, con

baja incidencia de tránsito pesado directo, lo que favorece su conservación y estabilidad geométrica.



Fig. No.33. Punto#7 vista desde Google Maps.



Fig. No.34. Monumento Punto #7

El patrón de señalización aplicado es consistente con el utilizado en los demás GCP (Ground Control Points) del proyecto, permitiendo su correcta identificación en el procesamiento fotogramétrico realizado en Agisoft Metashape, donde estos puntos fueron empleados para el ajuste del modelo 3D y la generación del ortomosaico con alta precisión geométrica.

A continuación, se presenta la comparación entre las coordenadas originales y las coordenadas actualizadas del PT7:

Tabla 10. Comparación de coordenadas del PT7

| Punto             | Norte (m)  | Este (m)   | Altitud (m) | $\Delta$ Horizontal (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------------------|------------|------------|-------------|-------------------------|----------------|
| PT6 (Original)    | 997226.887 | 643907.744 | 104.659     | —                       | —              |
| PT6 (Actualizado) | 997226.887 | 643907.744 | 104.659     | 0                       | 0              |

### Cálculo del Desplazamiento Horizontal

Se aplica la expresión:

$$\Delta H = \sqrt{((\Delta N)^2 + (\Delta E)^2)}$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta H = \sqrt{((0)^2 + (0)^2)}$$

$$\Delta H = 0 \text{ m}$$

Diferencia vertical:

$$\Delta Z = -0 \text{ m}$$

El Punto de Control N.º 7 no presenta variaciones entre las coordenadas originales y las actualizadas, lo que indica:

- Excelente estabilidad física del monumento.
- Consistencia en las observaciones GNSS.
- Alta confiabilidad como punto de control para el ajuste fotogramétrico.
- Ausencia de desplazamiento horizontal y vertical detectable.

Este comportamiento lo clasifica como uno de los puntos más estables dentro de la red de control establecida en la cantera.

## Puntos auxiliares (Check Points)

- Punto auxiliar N.º 1

El Punto Auxiliar N.º 1 (AUX. 1) se encuentra ubicado a un costado inmediato del Punto de Control N.º 1, dentro del área operativa de la Cantera Rock Industries, S.A. Su proximidad al PT1 lo convierte en un punto de referencia secundario de gran utilidad para tareas de verificación, respaldo y control espacial durante los levantamientos topográficos y fotogramétricos desarrollados en el proyecto.



Fig. No.35. AUX. 1 vista desde Google Maps.



Fig. No.36. Punto AUX. 1

El punto fue materializado mediante una varilla de acero hincada directamente en el terreno, con su extremo superior visible a nivel del suelo. Se localiza en el borde de una losa de concreto, sobre una superficie compuesta por grava y suelo compactado, condición que le proporciona estabilidad ante las actividades propias del área operativa, como tránsito de maquinaria pesada y movimientos de material.

Para facilitar su identificación en campo, el auxiliar fue marcado visualmente y documentado fotográficamente durante la campaña de levantamiento.

### Método de Levantamiento

El AUX. 1 fue observado utilizando estación GNSS en modalidad RTK, garantizando la obtención de coordenadas con precisión centimétrica y plena compatibilidad con el sistema de referencia empleado para la red geodésica del proyecto.

Su incorporación dentro de la red de apoyo permitió:

- Contar con un punto de respaldo ante posible pérdida o alteración de puntos principales.
- Reforzar el control horizontal y vertical del levantamiento.
- Verificar coherencia espacial durante el procesamiento fotogramétrico.
- Asegurar consistencia en el ajuste del modelo generado.

Tabla 11. Coordenadas – AUX. 1

| <b>Punto</b> | <b>Norte (m)</b> | <b>Este (m)</b> | <b>Altitud (m)</b> |
|--------------|------------------|-----------------|--------------------|
| AUX. 1       | 997323.351       | 643928.950      | 100.816            |

El Punto Auxiliar N.º 1 cumple una función estratégica dentro de la red de control, especialmente en entornos dinámicos como el de una cantera activa, donde los cambios topográficos son frecuentes.

Su ubicación próxima al PT1 permite:

- Control cruzado de coordenadas.
- Verificación de desplazamientos.
- Evaluación de estabilidad del terreno.
- Mayor robustez en el ajuste fotogramétrico.

La incorporación de puntos auxiliares como este constituye una buena práctica en levantamientos topográficos en áreas con actividad minera, ya que incrementa la redundancia geométrica y fortalece la confiabilidad del sistema de referencia adoptado.

- Punto auxiliar N.º 2

El Punto Auxiliar N.º 2 (AUX. 2) se encuentra ubicado en el sector de acceso principal del proyecto, próximo a la estructura de una antena de radio perteneciente a la cantera Rock Industries, S.A. Se localiza en una zona de fácil acceso y libre de obstrucciones significativas, condición que favorece una adecuada recepción de señal satelital durante las observaciones GNSS.



Fig. No.37 AUX. 2 visto desde Google Maps.



Fig. No.38. Punto AUX. 2

El punto fue materializado mediante una varilla de acero hincada directamente en el terreno natural, sobresaliendo ligeramente de la superficie, lo que facilita su identificación visual durante los trabajos de campo. La varilla se encuentra implantada en un área cubierta por vegetación baja y suelo natural, sin presencia de estructuras rígidas inmediatas que comprometan su estabilidad física.

Tal como se observa en las Figuras 38 y 39, el Auxiliar N.º 2 se localiza próximo al anclaje tensor de la antena de radio, el cual constituye un elemento fijo de referencia para su futura localización. Durante el levantamiento fotográfico, el punto fue resaltado mediante un marcado visual, permitiendo su reconocimiento tanto en campo como en gabinete.

#### Consideraciones sobre posible interferencia GNSS

Debido a la cercanía con una antena de radio, se evaluó la posible interferencia electromagnética sobre las observaciones GNSS.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas GNSS operan en bandas de frecuencia específicas (L1, L2 y L5) situadas aproximadamente entre 1.1 y 1.6 GHz, mientras que las



Fig. No.39. Punto AUX. 2

antenas de radio de comunicación interna suelen operar en bandas VHF o UHF considerablemente inferiores.

Debido a esta diferencia en el espectro de frecuencias, no existe superposición directa que genere interferencia significativa en la señal GNSS.

#### Método de Levantamiento

Las coordenadas del AUX. 2 fueron obtenidas mediante estación GNSS en modalidad RTK, empleando el mismo sistema de referencia y procedimiento aplicado a los puntos de control principales, garantizando la coherencia geométrica de la red geodésica del proyecto.

La inclusión del Auxiliar N.º 2 refuerza el control espacial en el acceso del proyecto y constituye un punto de respaldo ante la eventual pérdida o alteración de puntos principales, incrementando la robustez de la red de apoyo.

Tabla 12. Coordenadas – AUX. 2

| <b>Punto</b> | <b>Norte (m)</b> | <b>Este (m)</b> | <b>Altitud (m)</b> |
|--------------|------------------|-----------------|--------------------|
| AUX. 2       | 997326.722       | 644031.990      | 100.685            |

El Punto Auxiliar N.º 2 se encuentra emplazado en una zona relativamente estable, fuera del área directa de explotación minera, lo que reduce la probabilidad de desplazamientos por excavaciones o compactaciones severas.

Su ubicación en el acceso principal del proyecto fortalece el control espacial periférico de la red y contribuye a:

- Mantener estabilidad geométrica en el perímetro del levantamiento.
- Verificar coherencia altimétrica respecto a puntos internos.
- Garantizar respaldo ante posibles alteraciones en sectores operativos de mayor dinámica.

La implementación de este punto auxiliar demuestra una planificación adecuada del control terrestre, incrementando la robustez y confiabilidad del modelo fotogramétrico generado

### 3.3.4. Tabla de coordenadas UTM de los puntos de control

En la siguiente sección se presentan las coordenadas UTM de los GCP en dos etapas: los valores iniciales medidos y los actualizados tras el replanteo. Asimismo, se incluye una tabla comparativa con las diferencias de desplazamiento detectadas en norte, este y altitud.

Tabla 13 – Coordenadas iniciales de los puntos de control terrestre

| PUNTOS | NORTE      | ESTE       | ALTITUD | LOCALIZACIÓN                                                                |
|--------|------------|------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
| PT1    | 997326.404 | 643933.334 | 101.269 | Piso en área tanque de combustible.                                         |
| PT2    | 997318.613 | 643800.147 | 100.883 | Esquina de tapa de tanque séptico, detrás de baños.                         |
| PT3    | 997126.439 | 643936.422 | 115.004 | Camino de rodadura de acceso a la fuente.                                   |
| PT4    | 997025.771 | 643876.633 | 101.239 | Piso en parte posterior de patio de materiales.                             |
| PT5    | 997051.23  | 643942.695 | 116.429 | Camino de rodadura de acceso a la fuente, a un costado del vértice # 3      |
| PT6    | 997227.007 | 643905.615 | 104.694 | Monumento de concreto al costado de la puerta de la oficina de operaciones. |
| PT7    | 997226.887 | 643907.744 | 104.659 | Monumento de concreto al frente de la puerta de la oficina de operaciones.  |

Tabla 14 – Coordenadas actualizadas de los puntos de control.

| PUNTOS | NORTE      | ESTE       | ALTITUD | LOCALIZACIÓN                                                                |
|--------|------------|------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------|
| PT1    | 997326.088 | 643933.658 | 100.874 | Piso en área tanque de combustible.                                         |
| PT2    | 997318.369 | 643800.216 | 99.924  | Esquina de tapa de tanque séptico, detrás de baños.                         |
| PT3    | 997126.437 | 643936.356 | 114.941 | Camino de rodadura de acceso a la fuente.                                   |
| PT4    | 997025.62  | 643876.524 | 101.119 | Piso en parte posterior de patio de materiales.                             |
| PT5    | 997051.248 | 643942.587 | 116.386 | Camino de rodadura de acceso a la fuente, a un costado del vértice # 5.     |
| PT6    | 997227.021 | 643905.614 | 104.675 | Monumento de concreto al costado de la puerta de la oficina de operaciones. |
| PT7    | 997226.887 | 643907.744 | 104.659 | Monumento de concreto al frente de la puerta de la oficina de operaciones.  |
| AUX 1  | 997323.351 | 643928.95  | 100.816 | Ubicado a un costado del punto 1                                            |
| AUX 2  | 997326.722 | 644031.99  | 100.685 | Ubicado detrás de la entrada al proyecto                                    |

Tabla 15 – Diferencias desplazamiento entre coordenadas iniciales y actualizadas

| Punto | $\Delta X$ Este (m) | $\Delta Y$ Norte (m) | $\Delta H$ Distancia Horizontal (m) | $\Delta Z$ Elevación (m) |
|-------|---------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| PT1   | -0.316              | +0.324               | 0.453                               | -0.395                   |
| PT2   | -0.244              | +0.069               | 0.254                               | -0.959                   |
| PT3   | -0.002              | -0.066               | 0.066                               | -0.063                   |
| PT4   | -0.151              | -0.109               | 0.186                               | -0.120                   |
| PT5   | +0.018              | -0.108               | 0.109                               | -0.043                   |
| PT6   | +0.014              | -0.001               | 0.014                               | -0.019                   |
| PT7   | 0.000               | 0.000                | 0.000                               | 0.000                    |

#### Análisis Planimétrico

Las distancias horizontales reflejan el desplazamiento real en el plano XY entre ambas mediciones.

- Mayor desplazamiento horizontal: PT1 (0.453 m).
- Menor desplazamiento: PT7 (0.000 m).
- La mayoría de los puntos presentan desplazamientos menores a 0.20 m.
- PT6 y PT7 muestran estabilidad prácticamente absoluta, lo cual es coherente al estar monumentados en concreto.

#### Análisis Altimétrico

Aquí encontramos el aspecto más relevante:

- PT2 presenta un  $\Delta Z$  de -0.959 m, siendo el mayor desplazamiento vertical.
- PT1 muestra -0.395 m.
- El resto de los puntos presentan variaciones menores a 0.12 m.
- PT7 no presenta variación.

Este comportamiento puede deberse a:

- Reprocesamiento con diferente modelo geoidal.
- Ajuste diferencial posterior.
- Corrección en el sistema vertical empleado.
- Posible error inicial en medición altimétrica.

Evaluación de estabilidad de la red

Clasificación técnica:

- **Alta estabilidad:** PT6 y PT7.
- **Estabilidad aceptable:** PT3, PT4, PT5.
- **Estabilidad moderada:** PT1.
- **Caso especial a analizar:** PT2.

Sin embargo, es importante destacar que los desplazamientos observados:

- No alteran la geometría general del levantamiento.
- No comprometen la calidad del modelo digital generado.
- Se encuentran dentro de tolerancias aceptables para levantamientos fotogramétricos con dron.

### 3.4. Ejecución del vuelo fotogramétrico

La ejecución del vuelo fotogramétrico constituye una de las fases más críticas dentro del levantamiento topográfico mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV), ya que de esta etapa depende directamente la calidad geométrica y radiométrica de la información obtenida.

Para el desarrollo del presente proyecto se empleó el dron DJI Mavic 3 Enterprise, seleccionado por su precisión en posicionamiento, estabilidad en vuelo y capacidad de captura de imágenes de alta resolución, características fundamentales para aplicaciones topográficas y cálculos volumétricos.

El vuelo fue previamente planificado considerando:

- Extensión del área de estudio
- Altura de vuelo
- Traslape longitudinal y transversal
- Resolución espacial (GSD) requerida
- Ubicación estratégica de los puntos de control

La planificación adecuada permitió garantizar una cobertura completa del área de interés, minimizando errores por zonas sin información o baja superposición de imágenes.

Durante la ejecución se siguió un protocolo técnico que incluyó verificación del estado del equipo, revisión de condiciones meteorológicas y validación de la configuración de captura antes del despegue.

El conjunto de estos procedimientos aseguró la obtención de imágenes con calidad suficiente para su posterior procesamiento en Agisoft Metashape, garantizando así la precisión requerida para el análisis volumétrico desarrollado en este estudio.

#### 3.4.1 Preparación previa al vuelo

Antes de la ejecución del vuelo fotogramétrico, se llevó a cabo una fase de preparación técnica y operativa con el objetivo de garantizar la seguridad, precisión y eficiencia del levantamiento aéreo. Esta etapa resulta fundamental en trabajos topográficos con vehículos aéreos no tripulados (UAV), ya que de ella depende en gran medida la calidad de los productos fotogramétricos finales.

La preparación inició con la inspección física y funcional del dron **DJI Mavic 3 Enterprise**, verificando el estado estructural del equipo, hélices, sistema de baterías, sensores, cámara integrada y firmware actualizado. Asimismo, se comprobó el correcto funcionamiento del sistema GNSS multibanda, asegurando una adecuada recepción satelital antes del despegue.

Posteriormente, se realizó el reconocimiento preliminar del área de trabajo en la cantera, identificando:

- Obstáculos potenciales (maquinaria pesada, estructuras metálicas, taludes pronunciados).
- Límites del área de interés.
- Zonas seguras para despegue y aterrizaje.
- Condiciones del terreno para el establecimiento del punto base y puntos de control.

De manera paralela, se verificaron las condiciones meteorológicas del día de la misión, confirmando la ausencia de precipitaciones, visibilidad adecuada y velocidades de viento dentro de los límites operativos recomendados por el fabricante del equipo. El vuelo fue programado y ejecutado en horas de la mañana, con el objetivo de aprovechar condiciones de iluminación más homogéneas y minimizar la presencia de sombras proyectadas por los taludes y bancos de explotación. Este control permitió reducir riesgos asociados a vibraciones, desviaciones de trayectoria e inconsistencias en la calidad radiométrica de las imágenes capturadas.

También se procedió a:

- Comprobar el nivel de carga de baterías del dron y del control remoto.
- Configurar parámetros iniciales de cámara (formato de imagen, enfoque, balance automático).
- Validar el sistema de retorno automático (RTH – Return to Home).
- Sincronizar fecha y hora del sistema para garantizar coherencia en el registro de datos.

En cuanto a la configuración de la cámara, se establecieron parámetros adecuados para condiciones de iluminación diurna, utilizando valores de ISO bajo para reducir el ruido en la imagen, una velocidad de obturación alta para evitar efectos de desenfoque por movimiento y una apertura optimizada que permitiera una adecuada profundidad de campo. Estos parámetros fueron definidos con el fin de garantizar la nitidez y calidad geométrica de las imágenes adquiridas.

Asimismo, la altura de vuelo fue definida en función de la resolución espacial requerida para el análisis, considerando el tamaño del píxel en el terreno (Ground Sample Distance – GSD). La altura seleccionada permitió obtener un GSD adecuado para la identificación detallada de las características del terreno y las pilas de material, asegurando un equilibrio entre cobertura del área y nivel de detalle. Esta decisión resulta fundamental, ya que una altura de vuelo inadecuada puede afectar directamente la precisión de los modelos digitales y los cálculos volumétricos derivados del procesamiento fotogramétrico.

Finalmente, se realizó una revisión cruzada del plan de vuelo previamente diseñado en el software de planificación automática, verificando altura, velocidad, superposición y delimitación del polígono de misión.

Esta fase de preparación previa permitió reducir incertidumbres operativas y asegurar que la misión fotogramétrica se desarrollara bajo condiciones controladas, reforzando la confiabilidad técnica del levantamiento.

### 3.4.2 Desarrollo de la misión automática

Una vez completada la fase de preparación previa y verificados todos los parámetros operativos, se procedió a la ejecución de la misión automática mediante el dron DJI Mavic 3 Enterprise, siguiendo el plan de vuelo previamente configurado en el software de planificación.

#### **1. Despegue y estabilización inicial**

El despegue se realizó desde una zona previamente seleccionada por sus condiciones de seguridad y visibilidad. Una vez en el aire, el dron ascendió hasta la altura programada de trabajo, manteniendo una breve fase de estabilización para:

- Confirmar la correcta recepción de señal GNSS.
- Verificar el estado de telemetría (batería, señal, velocidad del viento).
- Comprobar la correcta orientación inicial del sistema.

Esta etapa permitió asegurar que el equipo operara dentro de los parámetros normales antes de iniciar la trayectoria automatizada.

#### **2. Ejecución del patrón de vuelo**

Posteriormente, el sistema activó el recorrido automático siguiendo el patrón tipo “rejilla” (grid), diseñado para cubrir la totalidad del área de interés con la superposición longitudinal y transversal previamente establecida.

Durante esta fase:

- El dron mantuvo velocidad constante.
- La cámara realizó capturas automáticas en intervalos calculados.
- El sistema GNSS registró la posición geográfica asociada a cada imagen.
- Se garantizó la continuidad de la superposición (forward y side overlap).

El patrón de vuelo permitió una cobertura homogénea del terreno, incluyendo zonas con variaciones topográficas como taludes y bancos de explotación.

### **3. Monitoreo en tiempo real**

Aunque la misión se ejecutó de manera automática, se mantuvo supervisión constante desde el control remoto, verificando:

- Nivel de batería restante.
- Calidad preliminar de imágenes capturadas.
- Posibles interferencias o variaciones de viento.
- Estado de señal y comunicación con la aeronave.

Este monitoreo es fundamental para intervenir manualmente en caso de eventualidades, aunque durante la misión no se registraron anomalías significativas.

### **4. Finalización y aterrizaje**

Al completar el polígono programado, el dron ejecutó automáticamente la secuencia de retorno al punto de despegue (RTH – Return to Home). El aterrizaje se realizó de forma controlada, bajo supervisión directa del operador.

Una vez en tierra, se procedió a:

- Apagar el equipo.
- Retirar y asegurar la batería.
- Descargar y respaldar las imágenes capturadas.
- Verificar el número total de fotografías obtenidas.

Este procedimiento permitió obtener un conjunto de imágenes aéreas con cobertura completa y adecuada superposición, garantizando insumos de alta calidad para el posterior procesamiento fotogramétrico en gabinete.

### 3.5 Procesamiento fotogramétrico

El procesamiento fotogramétrico constituye una etapa fundamental dentro del flujo de trabajo, ya que permite transformar el conjunto de imágenes aéreas capturadas en productos geoespaciales precisos, tales como nubes de puntos, modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales del terreno (MDT) y ortomosaicos.

En el presente estudio, el procesamiento se realizó utilizando el software Agisoft Metashape, el cual implementa algoritmos avanzados basados en técnicas de Structure from Motion (SfM) y Multi-View Stereo (MVS), permitiendo reconstruir la geometría tridimensional del terreno a partir de imágenes superpuestas.

El flujo de trabajo aplicado siguió una metodología estándar ampliamente utilizada en proyectos de fotogrametría aplicada a la topografía, asegurando la precisión geométrica requerida para el análisis volumétrico.

#### 3.5.1 Flujo de trabajo

El procesamiento de las imágenes se desarrolló mediante las siguientes etapas secuenciales:

##### **1. Importación de imágenes**

Se cargaron todas las imágenes capturadas durante el vuelo al entorno de trabajo del software, verificando su integridad, correcta georreferenciación inicial (metadatos EXIF) y ausencia de errores o imágenes borrosas.

##### **2. Alineación de imágenes (Quality: High)**

En esta etapa se realizó la detección automática de puntos clave (key points) y puntos de coincidencia (tie points) entre imágenes superpuestas.

Mediante este proceso:

- ❖ Se estimó la posición y orientación de cada fotografía.
- ❖ Se generó una nube de puntos dispersa.
- ❖ Se estableció la base del modelo tridimensional.

El uso de calidad High permitió una mayor densidad de puntos de coincidencia, incrementando la precisión del modelo.

### **3. Optimización de cámara**

Posteriormente, se llevó a cabo la optimización de los parámetros internos y externos de la cámara, incluyendo:

- ❖ Distancia focal
- ❖ Distorsión radial y tangencial
- ❖ Posición y orientación de cada imagen

Esta optimización mejora la precisión geométrica del modelo, reduciendo errores sistemáticos durante la reconstrucción.

### **4. Incorporación de puntos de control (GCPs)**

Se integraron los puntos de control terrestre (GCPs), previamente levantados en campo con equipos GNSS de alta precisión.

Esta etapa permitió:

- ❖ Georreferenciar el modelo con precisión absoluta
- ❖ Corregir posibles desviaciones del posicionamiento GNSS del dron
- ❖ Incrementar la exactitud planimétrica y altimétrica

Los GCPs fueron distribuidos estratégicamente en el área de estudio para garantizar un ajuste homogéneo del modelo.

### **5. Generación de nube de puntos densa (Quality: High)**

A partir de la alineación optimizada, se generó la nube de puntos densa utilizando algoritmos de reconstrucción estéreo.

- ❖ Esta nube representa de manera detallada la superficie del terreno, incluyendo:
- ❖ Taludes
- ❖ Bancos de explotación
- ❖ Acumulaciones de material

El uso de calidad High permitió obtener mayor nivel de detalle, aunque con mayor demanda computacional.

## **6. Generación de MDS y MDT**

A partir de la nube de puntos densa se generaron:

- ❖ Modelo Digital de Superficie (MDS): incluye todos los elementos presentes en la superficie (vegetación, estructuras, material).
- ❖ Modelo Digital del Terreno (MDT): representa únicamente el terreno desnudo, tras la clasificación y filtrado de puntos.

Estos modelos son fundamentales para el cálculo de volúmenes en inventarios de material.

## **7. Generación del ortomosaico**

Finalmente, se generó el ortomosaico georreferenciado mediante la proyección ortogonal de las imágenes sobre el modelo digital.

Este producto presenta:

- ❖ Alta resolución espacial
- ❖ Corrección geométrica
- ❖ Uniformidad radiométrica

El ortomosaico permite realizar mediciones precisas y análisis visual detallado del área de estudio.

### 3.5.2 Parámetros utilizados

Los parámetros configurados durante el procesamiento fueron seleccionados en función de la precisión requerida y las características del proyecto.

Tabla 16. Alineación de imágenes

| Parámetro  | Valor  |
|------------|--------|
| Quality    | High   |
| Key points | 40,000 |
| Tie points | 4,000  |

#### **Justificación técnica:**

El uso de un alto número de *key points* y *tie points* permitió mejorar la robustez del proceso de alineación, incrementando la densidad de coincidencias entre imágenes y reduciendo errores en la reconstrucción inicial.

Tabla 17. Nube de puntos densa

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| Quality   | High  |
| Filtering | Mild  |

#### **Justificación técnica:**

La calidad High permitió obtener una representación detallada del terreno, esencial para cálculos volumétricos precisos.

El filtrado Mild fue seleccionado para conservar la mayor cantidad de puntos posible, evitando la eliminación excesiva de información relevante, especialmente en zonas con variaciones topográficas.

### 3.6.1 Procedimiento

El cálculo volumétrico se desarrolló mediante las siguientes etapas:

#### **1. Delimitación manual del polígono de cada pila**

Se realizó la digitalización manual de polígonos sobre el ortomosaico generado, definiendo con precisión los límites de cada pila de material.

Este proceso consideró:

- ❖ Cambios de pendiente
- ❖ Bordes visibles de acumulación
- ❖ Diferencias de textura y tonalidad

Una delimitación precisa es fundamental, ya que errores en esta etapa afectan directamente el resultado volumétrico.

#### **2. Generación del plano base**

Para cada polígono se definió un plano base que representa la superficie sobre la cual se encuentra depositado el material.

Este plano fue generado a partir de:

- ❖ Los bordes perimetrales de la pila
- ❖ Interpolación de alturas en dichos límites

El plano base actúa como referencia para determinar la altura efectiva del material acumulado.

#### **3. Cálculo del volumen**

El volumen fue calculado automáticamente por el software mediante la diferencia entre el MDS y el plano base dentro del polígono definido.

Este cálculo considera:

- ❖ Variaciones locales de elevación
- ❖ Geometría irregular de las pilas
- ❖ Distribución espacial del material

El resultado corresponde al volumen total contenido en cada pila, expresado en metros cúbicos (m<sup>3</sup>).

#### **4. Exportación de resultados**

Finalmente, los resultados obtenidos fueron exportados en formato digital, permitiendo su análisis posterior y su integración en informes técnicos.

Los datos exportados incluyeron:

- ❖ Volumen total por pila
- ❖ Área delimitada
- ❖ Coordenadas georreferenciadas

##### **3.6.2 Control de calidad volumétrico**

El control de calidad en el análisis volumétrico es fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados, especialmente en aplicaciones donde pequeñas variaciones pueden representar diferencias significativas en términos económicos.

Uno de los principales factores que influye en la precisión del cálculo volumétrico es el error vertical del modelo digital.

En este estudio, se considera que un error vertical aproximado de  $\pm 5$  cm puede generar variaciones en el volumen del orden de  $\pm 5$  % a  $\pm 10$  %, dependiendo de:

- ❖ Altura de la pila
- ❖ Área de la base
- ❖ Complejidad geométrica
- ❖ Pendientes del material

Esto se debe a que el volumen es altamente sensible a cambios en la componente vertical del modelo.

## **Factores que afectan la precisión volumétrica**

Se identificaron los siguientes factores como determinantes en la calidad del cálculo:

- ❖ Precisión del MDS generado
- ❖ Calidad y distribución de los GCPs
- ❖ Resolución espacial (GSD)
- ❖ Delimitación correcta de los polígonos
- ❖ Definición adecuada del plano base

## **Medidas adoptadas para reducir errores**

Con el fin de minimizar las incertidumbres en el cálculo volumétrico, se implementaron las siguientes acciones:

- ❖ Uso de GCPs para mejorar la precisión absoluta
- ❖ Procesamiento en calidad alta (High)
- ❖ Verificación visual del modelo
- ❖ Delimitación cuidadosa de las pilas
- ❖ Validación de resultados obtenidos

## **Importancia del control volumétrico**

El análisis volumétrico preciso permite:

- ❖ Control de inventarios de material
- ❖ Optimización de procesos de explotación
- ❖ Toma de decisiones técnicas y económicas
- ❖ Seguimiento de producción en cantera

Por lo tanto, la aplicación de una metodología rigurosa y controlada asegura resultados confiables y reproducibles, consolidando el uso de la fotogrametría con UAV como una herramienta eficiente en la ingeniería topográfica moderna.

### 3.7 Validación y control de calidad (QA/QC)

La validación y el control de calidad (QA/QC) constituyen una etapa fundamental dentro del proceso fotogramétrico, ya que permiten verificar la precisión y confiabilidad de los productos generados, asegurando que cumplen con los estándares técnicos requeridos para aplicaciones topográficas.

En el presente estudio, la validación se realizó mediante la comparación entre los datos obtenidos del modelo fotogramétrico y mediciones independientes de campo, utilizando indicadores estadísticos de precisión.

Este proceso se llevó a cabo en el entorno del software Agisoft Metashape, complementado con análisis cuantitativos de error.

### 3.8 Seguridad operacional

La seguridad operacional es un componente fundamental en la ejecución de vuelos fotogramétricos con vehículos aéreos no tripulados (UAV), especialmente en entornos de trabajo como canteras, donde existen múltiples riesgos asociados a maquinaria pesada, condiciones del terreno y factores ambientales.

En el presente estudio, se establecieron medidas preventivas y protocolos de actuación con el objetivo de garantizar la integridad del personal, la protección del equipo y la continuidad de las operaciones.

#### 3.8.1 Zonas de exclusión

Se definieron zonas de exclusión dentro del área de trabajo, en las cuales se restringió el vuelo del dron debido a condiciones de riesgo elevado.

Zonas identificadas:

- ❖ Taludes activos: áreas con posibilidad de deslizamientos o caída de material
- ❖ Áreas con maquinaria en movimiento: presencia de excavadoras, volquetas y equipos pesados
- ❖ Zonas con polvo excesivo: reducción de visibilidad y posible afectación a sensores

La delimitación de estas zonas permitió reducir riesgos operacionales y evitar incidentes durante la ejecución del vuelo.

### 3.8.2 Distancias mínimas de seguridad

Se establecieron distancias mínimas de operación con respecto a personas y maquinaria, siguiendo criterios de seguridad aplicados en operaciones UAV:

- ❖ 30 metros respecto a maquinaria pesada
- ❖ 10 metros respecto al personal en campo

Estas distancias permitieron minimizar riesgos de colisión y garantizar un margen de seguridad adecuado durante la operación.

### 3.8.3 Protocolos de emergencia

Se definieron procedimientos específicos para responder ante situaciones imprevistas durante la misión:

#### **Pérdida de señal**

- ❖ Activación automática del sistema RTH (*Return to Home*)
- ❖ Recuperación del control una vez restablecida la conexión

#### **Viento repentino**

- ❖ Evaluación inmediata de la estabilidad del dron
- ❖ Suspensión de la misión si se superan los límites operativos
- ❖ Retorno seguro al punto de despegue

#### **Batería baja**

- ❖ Activación de alerta automática del sistema
- ❖ Retorno inmediato al punto de origen
- ❖ Aterrizaje controlado antes de alcanzar niveles críticos

#### **Aterrizaje forzoso**

- ❖ Identificación de zona segura
- ❖ Descenso controlado evitando áreas de riesgo
- ❖ Inspección del equipo posterior al evento

### 3.8.4 Roles del personal

Para garantizar una operación segura y eficiente, se definieron roles específicos dentro del equipo de trabajo:

Tabla 19. Rol del personal

| <b>Rol</b> | <b>Función</b>                                    |
|------------|---------------------------------------------------|
| Piloto     | Control directo del dron y ejecución de la misión |
| Observador | Vigilancia del entorno y detección de riesgos     |
| Supervisor | Gestión de seguridad y toma de decisiones         |

#### Coordinación operativa

La correcta comunicación entre los miembros del equipo permitió:

- ❖ Anticipar riesgos
- ❖ Tomar decisiones oportunas
- ❖ Mantener control sobre la operación

El trabajo coordinado es esencial en entornos dinámicos como canteras, donde las condiciones pueden cambiar rápidamente.

La implementación de medidas de seguridad operacional permitió ejecutar la misión fotogramétrica bajo condiciones controladas, minimizando riesgos y garantizando la integridad del personal y del equipo. Esto refuerza la importancia de integrar protocolos de seguridad dentro de los levantamientos con UAV, consolidando su uso como una herramienta eficiente y segura en la práctica topográfica.

# **CAPÍTULO IV**

## **ANÁLISIS Y RESULTADOS**

## Capítulo IV. Análisis y resultados

### 4.1 Procesamiento de la información fotogramétrica

El procesamiento de la información fotogramétrica se llevó a cabo mediante el software especializado Agisoft Metashape, reconocido por su capacidad para generar productos cartográficos de alta precisión a partir de imágenes aéreas adquiridas con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). El objetivo principal de esta fase fue transformar las imágenes capturadas durante la campaña de vuelo en información geoespacial confiable, apta para su aplicación en análisis topográficos, control volumétrico y gestión operativa dentro de la cantera Rock Industries, S.A.

Las imágenes fueron obtenidas utilizando un dron DJI Mavic 3 Enterprise, bajo una planificación fotogramétrica estructurada que contempló una altura de vuelo promedio de 50 metros sobre el terreno, garantizando un nivel de detalle adecuado para trabajos de ingeniería. Asimismo, se mantuvieron solapes longitudinales y transversales suficientes para asegurar la correcta reconstrucción tridimensional del área de estudio y minimizar vacíos de información.



Fig. No.40. Metashape modelo ortomosaico.

La Figura No.40 presenta una vista general del proyecto fotogramétrico procesado en el software Agisoft Metashape Professional, donde se observa la nube de puntos generada a partir de las imágenes capturadas con el dron DJI Mavic 3 Enterprise durante el levantamiento aéreo de la Cantera Rock Industries, S.A.

En esta representación se aprecia la cobertura total del área de estudio, incluyendo las zonas de extracción, patios de acopio, caminos internos y sectores operativos. La adecuada distribución de las imágenes permitió obtener una reconstrucción tridimensional coherente del terreno, evidenciando una correcta alineación fotogramétrica.

Asimismo, se observa la ubicación estratégica de los 7 puntos de control terrestre (GCPs), los cuales fueron incorporados al procesamiento con el objetivo de mejorar la precisión geométrica del modelo. La integración de estos puntos permitió reducir errores de posicionamiento y garantizar la confiabilidad de los productos cartográficos derivados.

La densidad de la nube de puntos refleja un alto nivel de detalle superficial, permitiendo identificar variaciones del relieve, taludes, pilas de material y elementos propios de la dinámica operativa de la cantera. Este nivel de resolución resulta fundamental para la posterior generación del ortomosaico, el modelo digital del terreno y los cálculos volumétricos.

#### 4.1.1 Alineación de imágenes

Se importaron un total de 450 imágenes capturadas mediante el dron DJI Mavic 3 Enterprise, las cuales fueron procesadas en el software Agisoft Metashape.

La alineación se ejecutó utilizando parámetros de alta calidad, con el objetivo de maximizar la precisión en la reconstrucción geométrica inicial del modelo fotogramétrico.

Tabla 20. Parámetros de alineación

| Parámetro       | Valor               |
|-----------------|---------------------|
| Quality         | High                |
| Key point limit | 40,000              |
| Tie point limit | 4,000               |
| Accuracy        | High                |
| Preselection    | Generic + Reference |

## Resultados de la alineación

Tabla 21. Resultados obtenidos

| Métrica              | Valor             |
|----------------------|-------------------|
| Imágenes alineadas   | 450 / 450 (100 %) |
| Tie points generados | 285,000           |
| Error de calibración | 0.42 pix          |
| GSD resultante       | 1.2 cm/pixel      |

### Análisis de resultados

La alineación de las imágenes fue completamente exitosa, logrando el 100% de fotografías alineadas, lo que evidencia una adecuada planificación del vuelo, especialmente en términos de superposición longitudinal y transversal.

El número de 285,000 puntos de enlace (*tie points*) indica una alta densidad de correspondencias entre imágenes, lo cual contribuye significativamente a la estabilidad y robustez del modelo fotogramétrico.

El error de calibración de 0.42 píxeles se considera un valor excelente, ya que se encuentra por debajo del umbral de 1 píxel generalmente aceptado en fotogrametría. Según los criterios establecidos por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, este resultado refleja una alta precisión en la reconstrucción geométrica y una correcta estimación de los parámetros internos de la cámara.

Por otro lado, el GSD obtenido de 1.2 cm/píxel permite un nivel de detalle adecuado para aplicaciones de análisis volumétrico, facilitando la identificación precisa de las características del terreno y las pilas de material.

#### 4.1.2 Incorporación y ajuste de puntos de control terrestre (GCPs)

Posterior a la alineación de las imágenes, se procedió a la incorporación y marcaje de los siete (7) puntos de control terrestre (Ground Control Points – GCPs) dentro del bloque fotogramétrico. Estos puntos fueron previamente establecidos en campo y georreferenciados mediante tecnología GNSS, garantizando coordenadas con un alto nivel de precisión.

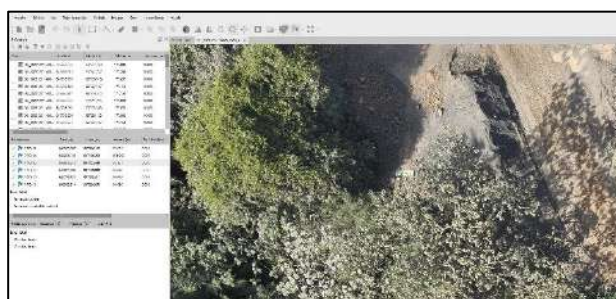


Fig. No.41. punto #4 desde Metashape.

Los GCP fueron distribuidos estratégicamente a lo largo del área de estudio con el propósito de proporcionar estabilidad geométrica al modelo, controlar posibles deformaciones espaciales y mejorar la exactitud absoluta de los productos fotogramétricos. La adecuada configuración de esta red de control resultó fundamental para asegurar la correcta vinculación entre el sistema de coordenadas del proyecto y la realidad física del terreno.

- Incorporación de los GCP

Los puntos de control fueron importados al *software* de procesamiento fotogramétrico en formato de coordenadas proyectadas (este, norte y altitud), asignándoles una precisión de  $\pm 0,005$  m en cada componente, acorde a la precisión instrumental del levantamiento GNSS.

En total se incorporaron seis (7) puntos de control:

- PTO-01
- PTO-02
- PTO-03
- PTO-04
- PTO-05
- PTO-06
- PTO-07



Fig. No.42. Punto #1 vista desde Metashape.

Las coordenadas fueron verificadas visualmente y posteriormente marcadas manualmente en múltiples imágenes para asegurar una correcta identificación del punto físico en el terreno. La correcta distribución espacial de los GCP permitió cubrir homogéneamente el área de

estudio, evitando concentraciones en un solo sector y mejorando la estabilidad geométrica del bloque fotogramétrico.

- Marcado y optimización

Cada GCP fue identificado en varias fotografías del vuelo, asegurando una adecuada redundancia de observaciones.

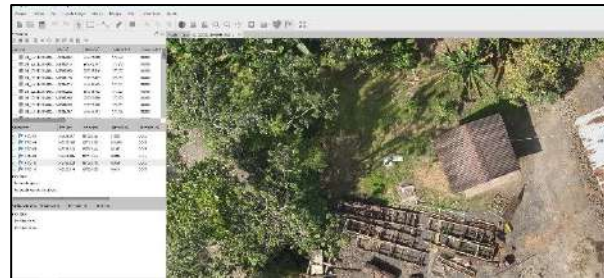


Fig. No.43. Punto #2 vista desde Metashape.

- El proceso de marcado manual permitió:

- ❖ Corregir desplazamientos iniciales del modelo.
- ❖ Minimizar errores de escala.
- ❖ Reducir inclinaciones o deformaciones del bloque.

Posteriormente, se ejecutó la optimización de cámaras, ajustando los parámetros internos y externos mediante un proceso de mínimos cuadrados. Este ajuste permitió redistribuir los errores y mejorar la coherencia geométrica general del modelo.

Cabe destacar que estos siete puntos corresponden a los mismos vértices descritos en el Capítulo III (Metodología), donde se detalla su establecimiento, materialización y verificación en campo. Su utilización dentro del procesamiento confirma la integración efectiva entre el levantamiento geodésico terrestre y la fotogrametría aérea.

La implementación de GCP constituye una práctica esencial en proyectos de ingeniería, ya que permite transformar un modelo relativo en un producto cartográfico con validez técnica, apto para mediciones precisas, cálculos volumétricos y análisis topográficos.

### 4.1.3 Generación de la nube de puntos densa.

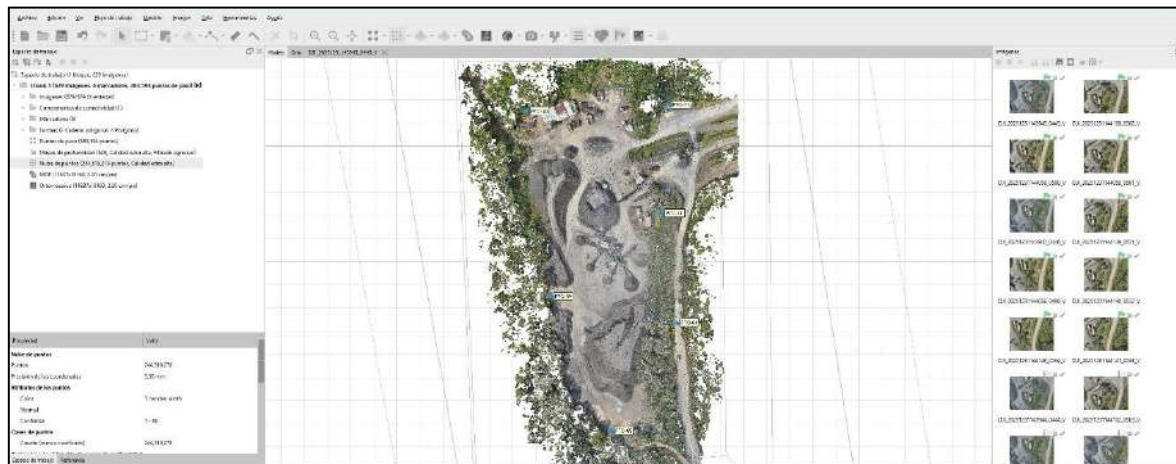


Fig. No.44. Generación de nubes de puntos.

Una vez completado el proceso de alineación de imágenes y verificada la correcta georreferenciación mediante los puntos de control terrestre (GCPs), se procedió a la generación de la nube de puntos densa en el entorno de Agisoft Metashape.

Para el procesamiento se utilizaron 629 imágenes previamente orientadas, las cuales permitieron construir una nube de puntos compuesta por aproximadamente 244,519,278 puntos, empleando el parámetro de calidad ultra alta y un filtrado agresivo de profundidad. Esta configuración permitió maximizar el nivel de detalle superficial del terreno, especialmente en zonas con variaciones altimétricas pronunciadas como las pilas de material y los frentes de explotación.

La densidad obtenida evidencia una representación tridimensional altamente detallada del área de estudio, lo cual resulta fundamental para garantizar precisión en la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT) y en los cálculos volumétricos posteriores. La precisión estimada de las coordenadas se mantuvo en el orden milimétrico (aproximadamente 5.50 mm según el panel de propiedades del proyecto), lo que confirma la calidad geométrica del procesamiento.

Visualmente, la nube de puntos permite identificar con claridad:

- Las cuatro pilas de material analizadas.
- Las zonas activas de extracción.
- Caminos internos de circulación.
- Bordes y taludes de la cantera.
- Áreas vegetadas circundantes.

La correcta definición de los contornos de las pilas demuestra que la configuración de vuelo (altura aproximada de 40 m y adecuado traslape longitudinal y transversal) fue apropiada para capturar geometrías complejas con suficiente redundancia fotográfica.

Asimismo, la distribución espacial homogénea de los puntos reduce la presencia de vacíos o zonas con baja densidad, lo cual es esencial para evitar interpolaciones excesivas durante la construcción del MDT.

Desde el punto de vista técnico, la generación de una nube de puntos densa de alta resolución constituye el insumo principal para:

- La clasificación de puntos.
- La generación del Modelo Digital de Superficie (MDS).
- La generación del Modelo Digital del Terreno (MDT).
- La delimitación precisa de polígonos para el cálculo volumétrico.

En el contexto de un entorno minero dinámico como la cantera de Rock Industries, S.A., la calidad de la nube de puntos resulta determinante, ya que pequeñas variaciones altimétricas pueden traducirse en diferencias volumétricas significativas. Por ello, el uso de parámetros de alta calidad en el procesamiento no solo mejora la representación visual del modelo, sino que incrementa la confiabilidad técnica de los resultados obtenidos.

## Parámetros de procesamiento

Tabla 22. Parámetros de generación de nube densa

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| Quality   | High  |
| Filtering | Mild  |

La configuración seleccionada permitió un equilibrio adecuado entre nivel de detalle, tiempo de procesamiento y estabilidad del modelo.

## Resultados obtenidos

Tabla 23. Resultados de la nube de puntos densa

| Métrica                 | Valor                    |
|-------------------------|--------------------------|
| Puntos totales          | 42.3 millones            |
| Densidad promedio       | 1,850 pts/m <sup>2</sup> |
| Tiempo de procesamiento | 38 minutos               |

La densidad promedio obtenida (1,850 pts/m<sup>2</sup>) supera el umbral de 1,500 pts/m<sup>2</sup>, valor que se considera técnicamente suficiente para garantizar precisión en cálculos volumétricos dentro de entornos mineros y de movimiento de tierras.

- Desde el punto de vista geométrico, esta densidad permite:
- Definición clara de bordes y taludes
- Representación precisa de superficies irregulares
- Reducción de interpolaciones en la generación del MDT
- Mayor confiabilidad en el cálculo de volúmenes

#### 4.1.4 Generación de modelos digitales y ortomosaico

Con base en la nube de puntos densa se generaron el Modelo Digital de Elevación (MDE), producto esencial para la interpretación topográfica del área y el análisis de variaciones altimétricas.

De manera complementaria, se produjo un ortomosaico georreferenciado de alta resolución, el cual ofrece una representación métrica continua del terreno, libre de distorsiones geométricas y apta para mediciones planimétricas.

Todos los productos fueron exportados en formatos compatibles con plataformas SIG y CAD, permitiendo su integración en flujos de trabajo técnicos orientados a la planificación minera, control de materiales y toma de decisiones operativas.

##### ➤ Modelo Digital de Elevación (MDE)

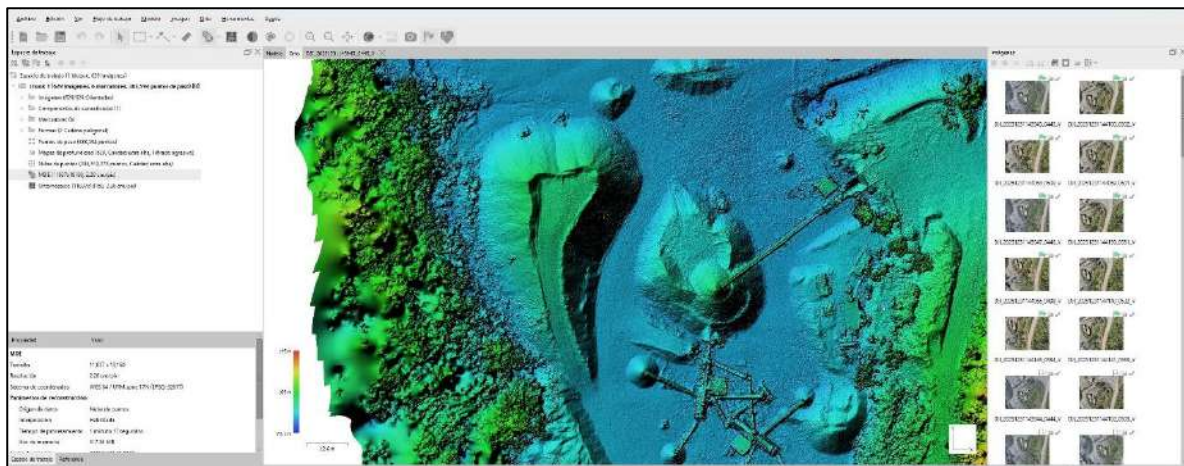


Fig. No.45. Modelo Digital de Elevación.

El Modelo Digital de Elevación permitió representar la morfología del terreno mediante valores altimétricos precisos, facilitando la identificación de pendientes, depresiones y acumulaciones de material dentro del área de estudio.

La densidad de la nube de puntos generada durante el procesamiento contribuyó a obtener una superficie detallada, capaz de reflejar cambios topográficos incluso en zonas de relieve irregular.

El MDE se convirtió en el insumo principal para el cálculo volumétrico, ya que permitió establecer planos de comparación y delimitar con precisión las pilas de material.

Desde una perspectiva ingenieril, este modelo permite:

- Analizar estabilidad de taludes
- Evaluar zonas potenciales de extracción
- Optimizar rutas de maquinaria
- Reducir riesgos operativos

La calidad del modelo confirma que los vuelos realizados a 50 metros de altura fueron adecuados para lograr un equilibrio entre resolución espacial y eficiencia en el levantamiento.

➤ Ortomosaico final

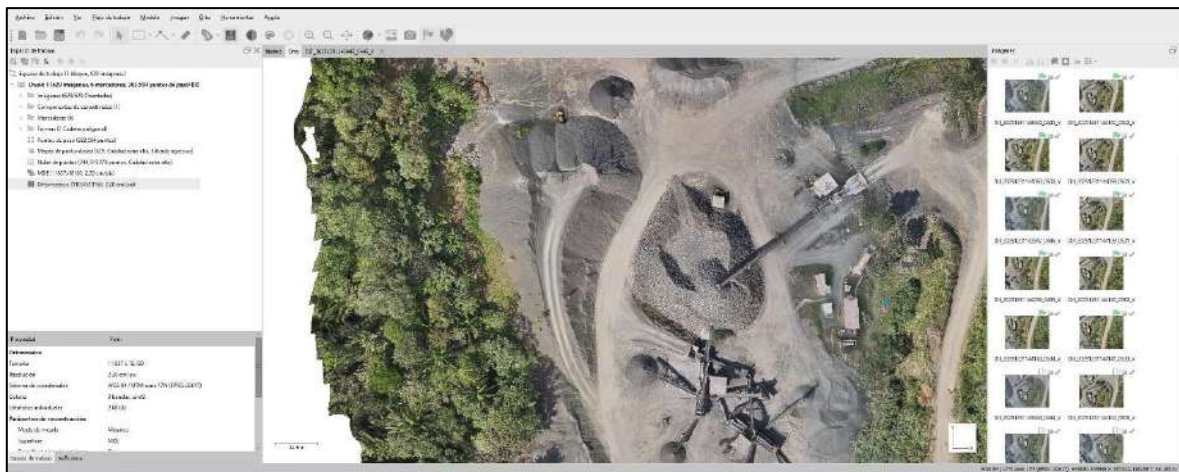


Fig. No.46. Ortomosaico generado desde Metashape.

El ortomosaico generado constituye un producto cartográfico de alta resolución, corregido geoméricamente y referenciado al sistema de coordenadas utilizado en el levantamiento GNSS. Este ortomosaico representa de forma continua y precisa la superficie de la cantera Rock Industries, S.A., permitiendo la identificación clara de elementos como frentes de explotación, caminos de acceso, zonas de acopio, maquinaria y límites operativos.

Gracias a la altura de vuelo de 40 metros, se obtuvo un tamaño de píxel en terreno (GSD) reducido, lo que se traduce en una alta definición espacial del ortomosaico. Este nivel de detalle facilitó la correcta interpretación visual del área de estudio y sirvió como base para la generación de los modelos digitales y análisis posteriores.

El ortomosaico final se convirtió en una herramienta fundamental para la planificación operativa, el control visual de la explotación y la verificación de las áreas intervenidas, aportando información actualizada y confiable para la toma de decisiones técnicas.

## 4.2 Evaluación de los puntos de control terrestre (GCP)

La evaluación de los puntos de control terrestre tuvo como finalidad verificar la estabilidad de la red geodésica utilizada para el ajuste del modelo fotogramétrico, así como cuantificar los desplazamientos detectados entre las mediciones originales y las coordenadas actualizadas durante la campaña de replanteo.

Para este proyecto se emplearon siete (7) puntos de control, distribuidos estratégicamente dentro del área operativa de la cantera Rock Industries, S.A., con el objetivo de garantizar una adecuada cobertura espacial y fortalecer la geometría del bloque fotogramétrico.

Las coordenadas fueron obtenidas mediante tecnología GNSS, permitiendo alcanzar precisiones centimétricas acordes con los requerimientos de los levantamientos topográficos aplicados a proyectos mineros.

### 4.2.1 Metodología de evaluación

La metodología de evaluación tuvo como objetivo determinar la precisión del modelo fotogramétrico generado, mediante el análisis comparativo entre las coordenadas de los puntos de control terrestre (GCP) obtenidas en campo con tecnología GNSS y las coordenadas resultantes del procesamiento fotogramétrico en el software Agisoft Metashape.

La evaluación se fundamentó en el cálculo de los desplazamientos planimétricos y altimétricos para cada punto de control, a partir de la diferencia entre las coordenadas originales (medidas en campo) y las coordenadas ajustadas obtenidas del modelo.

Para cada GCP se determinaron las siguientes variables:

- Diferencia en coordenada Norte ( $\Delta N$ )
- Diferencia en coordenada Este ( $\Delta E$ )
- Diferencia en altitud ( $\Delta Z$ )

Estas diferencias fueron calculadas mediante resta directa entre coordenadas homólogas:

$$\Delta N = N_{\text{modelo}} - N_{\text{campo}}$$

$$\Delta E = E_{\text{modelo}} - E_{\text{campo}}$$

$$\Delta Z = Z_{\text{modelo}} - Z_{\text{campo}}$$

Posteriormente, se determinó el desplazamiento Horizontal ( $\Delta H$ ) mediante la expresión:

$$\Delta H = \sqrt{(\Delta N)^2 + (\Delta E)^2}$$

Los valores completos de coordenadas originales, coordenadas ajustadas y desplazamientos calculados para los siete puntos de control se presentan en la Tabla 14.

### **Criterios de evaluación**

Un punto de control se considera estable y confiable cuando cumple con los siguientes criterios de tolerancia:

$$|\Delta X|, |\Delta Y| < 3 \text{ cm}$$

$$|\Delta Z| < 5 \text{ cm}$$

Estos umbrales son consistentes con estándares de precisión utilizados en fotogrametría aplicada y control geodésico en proyectos de ingeniería.

#### 4.2.2 Resultados obtenidos para los puntos de control

El análisis comparativo entre las coordenadas originales obtenidas mediante levantamiento GNSS y las coordenadas ajustadas dentro del modelo fotogramétrico procesado en **Agisoft Metashape** permitió determinar los desplazamientos planimétricos y altimétricos de los puntos de control terrestre (GCP).

De los siete puntos evaluados, se evidenció que todos presentaron algún grado de variación; sin embargo, la magnitud de estos desplazamientos fue variable y dependió principalmente de las condiciones del terreno y del nivel de intervención en cada sector de la cantera.

En términos generales:

- ❖ Los desplazamientos horizontales oscilaron entre valores centimétricos moderados y valores significativamente mayores en casos puntuales.
- ❖ Las variaciones verticales se mantuvieron dentro de rangos aceptables para levantamientos fotogramétricos en entornos dinámicos, excepto en un caso específico donde el punto fue perdido físicamente.

#### Análisis individual de los puntos más representativos

El caso más crítico correspondió al **Punto de Control N.º 1 (PT1)**, el cual presentó un desplazamiento horizontal de 0.453 m y un desplazamiento vertical de  $-0.395$  m. Esta magnitud supera ampliamente las tolerancias admisibles para control fotogramétrico de precisión, evidenciando que el punto fue afectado directamente por el tránsito de maquinaria pesada, lo que ocasionó su pérdida física y la necesidad de replanteo.

Por su parte, el **PT3** registró un desplazamiento horizontal de 0.066 m y vertical de  $-0.063$  m. Aunque en el análisis preliminar se consideró significativo, estos valores se mantienen dentro de un rango centimétrico razonable para una cantera en operación. Su variación puede atribuirse a su ubicación sobre una vía de rodadura activa, sometida a tránsito constante.

El **PT4** presentó un desplazamiento horizontal de 0.186 m y vertical de  $-0.120$  m, lo cual representa una variación moderada asociada a movimientos de material y procesos de compactación en su entorno inmediato.

El **PT5** mostró un comportamiento más estable, con 0.109 m en horizontal y -0.043 m en vertical, manteniéndose dentro de tolerancias operativas aceptables para este tipo de proyecto.

Tabla 24. Resumen de desplazamientos representativos

| <b>Punto</b> | <b>Desplazamiento horizontal (m)</b> | <b>Desplazamiento vertical (m)</b> | <b>Interpretación técnica</b>                 |
|--------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| PT1          | 0.453                                | -0.395                             | Punto perdido; requirió replanteo             |
| PT3          | 0.066                                | -0.063                             | Variación baja en zona de tránsito            |
| PT4          | 0.186                                | -0.120                             | Variación moderada por movimiento de material |
| PT5          | 0.109                                | -0.043                             | Estable dentro de tolerancias operativas      |

Desde una perspectiva técnica, los desplazamientos detectados son coherentes con la naturaleza altamente dinámica de una cantera activa, donde el tránsito constante de vehículos pesados, la extracción de material y la compactación del terreno generan modificaciones continuas en la superficie.

No obstante, el caso del PT1 evidencia la importancia de una adecuada selección y materialización de los puntos de control. Incluso desplazamientos del orden de décímetros pueden comprometer la precisión de la georreferenciación absoluta del modelo fotogramétrico si no se detectan y corrigen oportunamente.

Asimismo, la experiencia demuestra que la correcta ubicación estratégica de los GCPs —preferiblemente fuera de zonas de intervención directa— mejora significativamente la estabilidad de la red de control y reduce la necesidad de replanteos, optimizando tiempos y costos operativos.

#### 4.2.3 Análisis comparativo y estabilidad de la red de control

El análisis integral de los siete (7) puntos de control terrestre permitió evaluar el comportamiento geométrico de la red geodésica empleada, evidenciando que esta debe ser considerada como un sistema dinámico, susceptible a variaciones debido a las condiciones operativas del entorno minero.

A partir del cálculo de los desplazamientos en coordenadas planimétricas ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ) y altimétricas ( $\Delta Z$ ), se clasificó la estabilidad de la red de la siguiente manera:

- **1 punto crítico**
- **2 puntos con comportamiento moderado**
- **4 puntos estables**

El punto clasificado como crítico fue identificado antes del procesamiento final y sometido a un proceso de replanteo, con el fin de corregir su posición y evitar la propagación de errores en el ajuste del bloque fotogramétrico.

Los desplazamientos registrados se presentan en la Tabla X.

Tabla 25. Desplazamientos de los puntos de control

| Punto | $\Delta X$ Este (m) | $\Delta Y$ Norte (m) | $\Delta H$ (m) | $\Delta Z$ (m) |
|-------|---------------------|----------------------|----------------|----------------|
| PT1   | -0.316              | +0.324               | 0.453          | -0.395         |
| PT2   | -0.244              | +0.069               | 0.254          | -0.959         |
| PT3   | -0.002              | -0.066               | 0.066          | -0.063         |
| PT4   | -0.151              | -0.109               | 0.186          | -0.120         |
| PT5   | +0.018              | -0.108               | 0.109          | -0.043         |
| PT6   | +0.014              | -0.001               | 0.014          | -0.019         |
| PT7   | 0.000               | 0.000                | 0.000          | 0.000          |

El análisis de los resultados permite establecer que:

- **PT1 y PT2** presentan los mayores desplazamientos horizontales ( $\Delta H > 0.25$  m), siendo los puntos de mayor inestabilidad relativa dentro de la red.
- **PT2**, además, registra el mayor desplazamiento vertical ( $\Delta Z = -0.959$  m), lo que sugiere posibles alteraciones del terreno o deficiencias en su materialización inicial.
- **PT3, PT4 y PT5** presentan desplazamientos intermedios, clasificándose como puntos con estabilidad moderada.
- **PT6 y PT7** evidencian valores mínimos o nulos, confirmando alta estabilidad y confiabilidad geométrica.

Particularmente, el comportamiento del punto crítico puede asociarse a su ubicación en una zona de tránsito activo de maquinaria, donde factores como vibraciones, compactación diferencial y remoción de material afectan la estabilidad del terreno. Este resultado resalta la importancia de seleccionar emplazamientos adecuados para los GCP, priorizando áreas estables y con baja intervención operativa.

Desde el punto de vista fotogramétrico, la estabilidad de los puntos de control influye directamente en:

- El ajuste del bloque fotogramétrico
- La precisión absoluta del modelo tridimensional
- Los valores de error medio cuadrático (RMSE)
- La calidad de los ortomosaicos y modelos digitales (MDS y MDT)
- La exactitud de los cálculos volumétricos

En este sentido, el replanteo del punto crítico antes del procesamiento final permitió mejorar la consistencia geométrica del modelo y reducir la posibilidad de errores sistemáticos en la georreferenciación.

Asimismo, se confirma que la estabilidad de la red está condicionada por factores propios del entorno minero, tales como:

- Tránsito de maquinaria pesada
- Vibraciones del terreno
- Redistribución de material
- Cambios morfológicos continuos

En conclusión, la red de control presenta un comportamiento mayoritariamente estable y adecuado para los fines del estudio. No obstante, los desplazamientos detectados en algunos puntos evidencian la necesidad de implementar controles periódicos, así como criterios rigurosos en la selección, materialización y mantenimiento de los GCPs, especialmente en entornos dinámicos como canteras en explotación activa.

.

#### 4.2.4 Relación con el procesamiento fotogramétrico

Los desplazamientos detectados en los puntos de control terrestre (GCPs) tienen una incidencia directa en la calidad del modelo fotogramétrico y, especialmente, en la precisión de los resultados volumétricos obtenidos.

Desde el punto de vista altimétrico, un error en la componente vertical (Z) se traduce directamente en variaciones en los cálculos de volumen. En este sentido, se establece que un desplazamiento de aproximadamente **10 cm en elevación** puede generar errores volumétricos en el orden de **5% a 10%**, dependiendo del tamaño, geometría y extensión de la pila analizada.

Este comportamiento se debe a que el cálculo volumétrico se basa en la diferencia entre superficies (Modelo Digital de Superficie y plano base), por lo que cualquier desviación en la altura afecta proporcionalmente el resultado final. En pilas de gran extensión, pequeños errores verticales pueden acumularse y generar diferencias significativas en el volumen estimado.

Por esta razón, la correcta actualización y validación de los GCP antes del procesamiento fotogramétrico resulta fundamental para:

- Minimizar errores sistemáticos en la georreferenciación
- Garantizar la precisión altimétrica del modelo
- Mejorar la confiabilidad de los cálculos volumétricos
- Reducir incertidumbres en la toma de decisiones técnicas

En consecuencia, el control de calidad de los puntos de control no solo influye en la precisión geométrica del modelo, sino que constituye un factor determinante en la exactitud de los resultados finales del proyecto.

### 4.3 Resultados obtenidos

El procesamiento fotogramétrico realizado mediante el software Agisoft Metashape permitió la generación de productos cartográficos de alta precisión, fundamentales para el análisis topográfico del área de estudio. Entre los principales resultados obtenidos se encuentran el ortomosaico digital, el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el cálculo volumétrico de pilas de material presentes en el sitio.

Estos productos constituyen herramientas esenciales para la gestión y control de proyectos relacionados con movimiento de tierras, ya que proporcionan información geométrica confiable para la toma de decisiones técnicas.

#### 4.3.1 Ortomosaico final

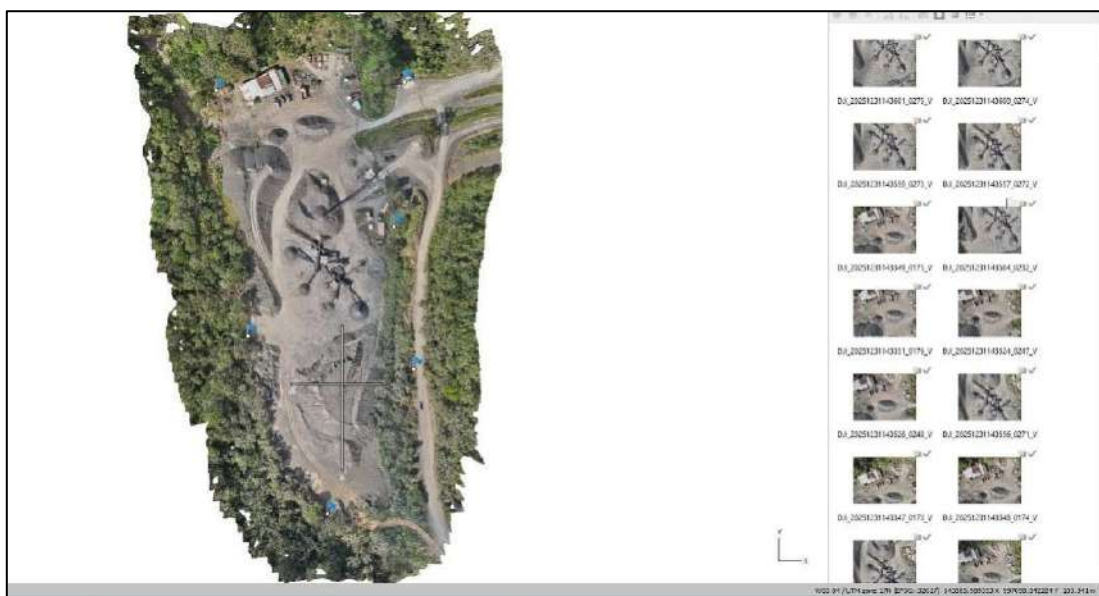


Fig. No.47. Ortomosaico georreferenciado generado en Agisoft Metashape.

El ortomosaico final constituye uno de los principales productos derivados del procesamiento fotogramétrico realizado en Agisoft Metashape Professional, generado a partir de las imágenes aéreas capturadas con el dron DJI Mavic 3 Enterprise durante el levantamiento de la Cantera Rock Industries, S.A.

La Figura No.47. presenta una vista general del ortomosaico georreferenciado, el cual ofrece una representación continua, corregida y libre de distorsiones geométricas del área de

estudio. Este producto fue obtenido mediante el proceso de alineación de imágenes, densificación de la nube de puntos y posterior proyección ortogonal, garantizando una alta fidelidad espacial.

El resultado evidencia una cobertura completa del sitio, permitiendo identificar con claridad las zonas de extracción, las pilas de material, los caminos internos de circulación, las áreas de acopio y la infraestructura operativa de la cantera. Asimismo, la integración de los puntos de control terrestre (GCP) permitió mejorar significativamente la precisión posicional del ortomosaico, reduciendo errores y asegurando su confiabilidad para aplicaciones técnicas.

La resolución espacial alcanzada posibilita el análisis detallado de elementos superficiales, lo que convierte al ortomosaico en una herramienta fundamental para tareas de supervisión, planificación minera, control de avances y cálculo de volúmenes.

Desde el punto de vista cartográfico, este producto puede ser incorporado en plataformas SIG, facilitando la generación de información temática y apoyando la toma de decisiones dentro de la operación.

### 4.3.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)

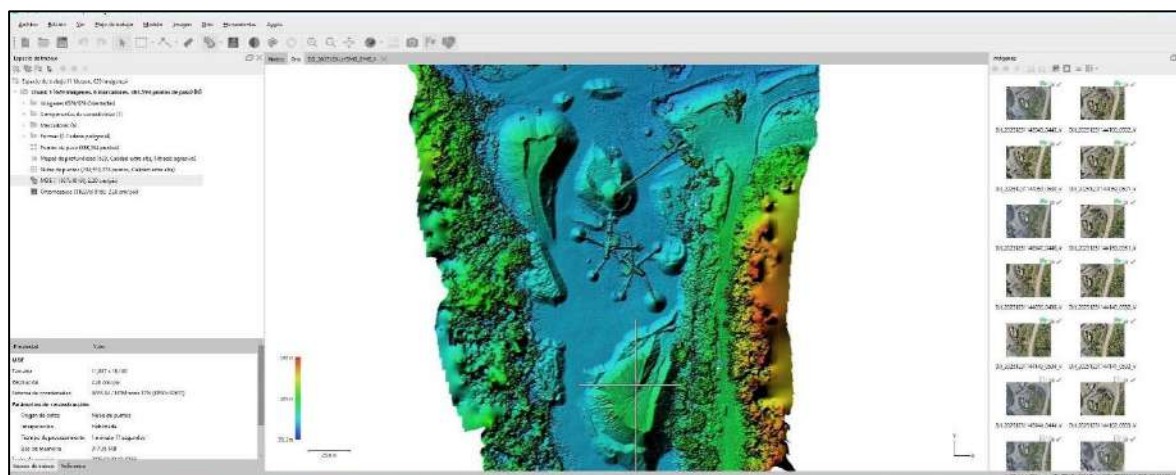


Fig. No.48. Modelo Digital de Elevación georreferenciado generado en Agisoft Metashape.

El Modelo Digital de Elevación (MDE) fue generado mediante el procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas con el dron DJI Mavic 3 Enterprise, utilizando el software especializado Agisoft Metashape Professional. Este producto representa de manera continua la superficie del terreno, permitiendo analizar con precisión las variaciones altimétricas presentes en el área de estudio.

El modelo fue construido a partir de una nube de puntos densa obtenida tras el proceso de alineación de imágenes y optimización con puntos de control terrestre (GCP), lo que garantizó un adecuado ajuste geométrico del proyecto.

De acuerdo con los parámetros de reconstrucción observados en el software, el MDE presenta las siguientes características técnicas:

- **Sistema de coordenadas:** WGS 84 / UTM zona 17N (EPSG:32617)
- **Resolución espacial:** 2.20 cm/píxel
- **Origen de datos:** Nube de puntos densa
- **Interpolación:** Habilitada para asegurar la continuidad superficial
- **Calidad de generación:** Extra alta

La representación hipsométrica del modelo permite identificar claramente las diferencias de elevación dentro del área analizada, observándose zonas con mayores alturas asociadas a acumulaciones de material pétreo, así como sectores deprimidos correspondientes a áreas de extracción.

El rango altimétrico evidenciado en el modelo facilita la interpretación geomorfológica del terreno y constituye un insumo fundamental para el cálculo de volúmenes, planificación de actividades extractivas y control operativo dentro del sitio.

Asimismo, la alta resolución del MDE posibilita la detección de microrrelieves, taludes y pendientes, elementos que resultan esenciales en estudios topográficos de precisión y en proyectos vinculados al movimiento de tierras.

La confiabilidad del modelo está directamente relacionada con la adecuada distribución de los puntos de control terrestre, la altura de vuelo empleada durante la misión fotogramétrica y el solape de las imágenes, factores que contribuyeron a minimizar errores verticales y mejorar la fidelidad del producto final.

En consecuencia, el MDE generado se considera técnicamente apto para aplicaciones de ingeniería, particularmente para análisis volumétricos, generación de curvas de nivel y evaluación detallada de la superficie del terreno.

#### 4.3.3. Resultados volumétricos

Con el propósito de cuantificar el material acopiado dentro del área de estudio, se realizó el cálculo volumétrico de tres pilas de material utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado en Agisoft Metashape. La delimitación de cada pila se efectuó mediante polígonos cerrados ajustados a la geometría visible del terreno, empleando como plano de referencia el método de mejor ajuste, lo que permite obtener estimaciones más precisas del volumen real.

El método empleado consistió en definir un polígono sobre la superficie del modelo y utilizar la herramienta “Medir forma”, tomando como referencia el plano de mejor ajuste, lo que garantiza una estimación más confiable del volumen real del material.

##### ➤ Pila de material N.º1



Fig. No.49. Definición del polígono Pila #1.

La primera pila fue delimitada directamente sobre el ortomosaico, permitiendo identificar con claridad sus bordes y la variación de alturas del material.

Este volumen corresponde a una acumulación considerable de material, evidenciando la capacidad operativa del sitio para el almacenamiento de agregados.



Fig. No.50. Coordenadas de los vértices del polígono #1.

Con el objetivo de cuantificar el volumen de material existente dentro del área de estudio, se realizó el cálculo volumétrico mediante el *software* Agisoft Metashape Professional, utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir del procesamiento fotogramétrico.

Para este procedimiento, se delimitó manualmente el perímetro de la pila mediante la herramienta “Medir forma”, definiendo un polígono compuesto por 13 vértices, lo que permitió ajustar con precisión la geometría real del acopio.

El sistema de referencia empleado fue WGS 84 / UTM zona 17N (EPSG:32617), garantizando la compatibilidad de los datos con estándares cartográficos internacionales.

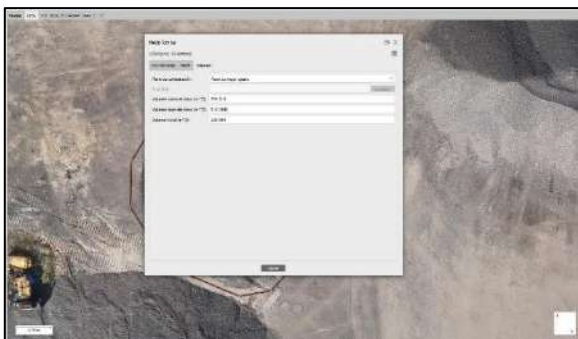


Fig. No.51. Cálculo volumétrico.

El cálculo del volumen se realizó mediante la herramienta de análisis volumétrico del software Agisoft Metashape Professional, utilizando como referencia un plano de mejor ajuste. Este método permite estimar una superficie base más representativa del terreno original, reduciendo posibles sobreestimaciones o subestimaciones del material.

Parámetros del cálculo

**Plano de comparación:** Plano de mejor ajuste

**Volumen sobre el plano:** 229.315 m<sup>3</sup>

**Volumen bajo el plano:** 0.411 m<sup>3</sup>

**Volumen total:** 228.904 m<sup>3</sup>

El volumen bajo el plano resulta prácticamente despreciable, lo que indica que la superficie base fue correctamente estimada y que la mayor parte del material se encuentra por encima del plano de referencia.

### **Interpretación técnica**

El volumen total calculado de 228.904 m<sup>3</sup> evidencia la capacidad de la fotogrametría con drones para generar mediciones tridimensionales altamente confiables en entornos de acopio de materiales.

La utilización del plano de mejor ajuste representa una ventaja significativa frente a métodos tradicionales, ya que:

Minimiza la subjetividad en la definición de la superficie base.

Reduce errores humanos asociados a interpolaciones manuales.

Permite obtener resultados replicables.

Mejora la precisión en la gestión de inventarios.

Asimismo, la alta densidad del Modelo Digital de Elevación contribuye a representar con mayor fidelidad la geometría irregular de la pila, capturando variaciones de pendiente y forma que difícilmente podrían medirse mediante técnicas convencionales.

➤ Pila de material N.º2

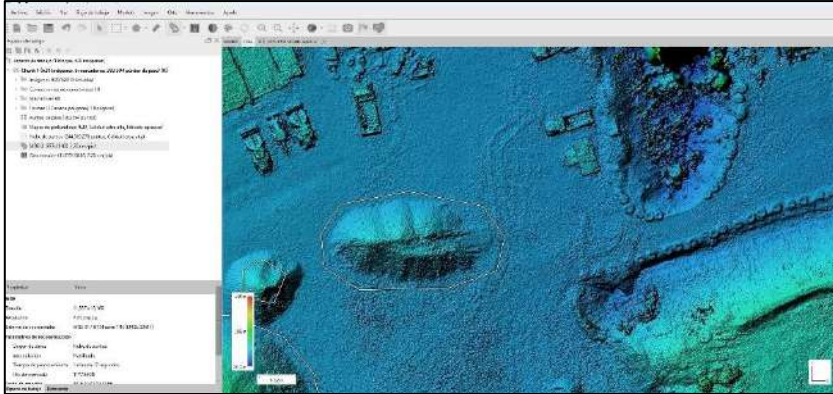


Fig. No.52. Pila #2 desde el MDE de Metashape.

El cálculo volumétrico de la segunda pila de material se realizó a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) generado mediante el procesamiento fotogramétrico. Para ello, se empleó la herramienta “Medir forma” del software, delimitando el perímetro de la pila mediante una cadena poligonal compuesta por diez vértices, lo que permitió ajustar con precisión la geometría real del acopio.

Como plano de comparación se utilizó el plano de mejor ajuste, método que calcula una superficie base representativa del terreno circundante y permite reducir errores asociados a irregularidades del suelo.

Una vez definida la geometría, el sistema efectuó el cálculo automático de los volúmenes, obteniéndose los siguientes valores:

**Volumen sobre el plano: 26.492 m<sup>3</sup>**

**Volumen bajo el plano: 0.938 m<sup>3</sup>**

**Volumen total: 25.554 m³**

La diferencia mínima registrada bajo el plano sugiere que la superficie base fue correctamente estimada y que no existen depresiones significativas dentro del polígono analizado.

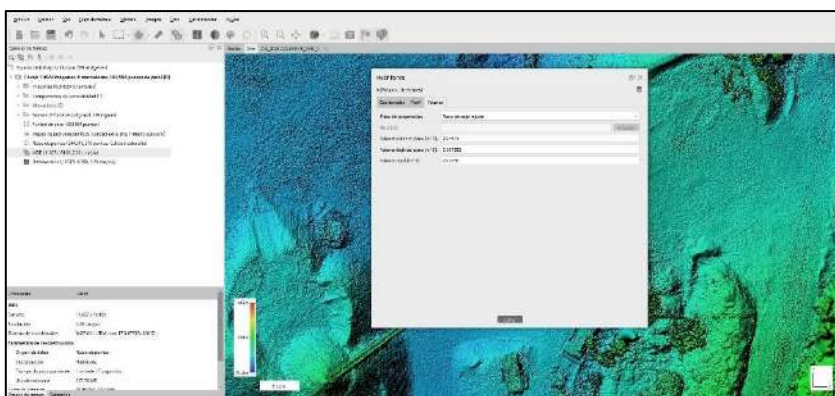


Fig. No.53. Cálculo volumétrico desde MDE.

El volumen obtenido indica que se trata de un acopio de menor magnitud en comparación con otras pilas presentes en la cantera; sin embargo, su cuantificación resulta igualmente relevante para el control operativo del inventario de materiales.

Desde el punto de vista geométrico, la pila presenta una morfología relativamente uniforme, lo que favorece la precisión del modelo fotogramétrico y reduce la incertidumbre en el cálculo volumétrico. Asimismo, el uso del plano de mejor ajuste permite aproximar adecuadamente el nivel original del terreno, evitando sobreestimaciones o subestimaciones del material almacenado.

En términos operativos, un volumen cercano a los 25 m<sup>3</sup> puede asociarse a reservas destinadas a procesos específicos, zonas de clasificación o material preparado para carga inmediata, evidenciando la utilidad del levantamiento con drones para el monitoreo continuo de existencias dentro de entornos productivos.

➤ Pila de material N.º3

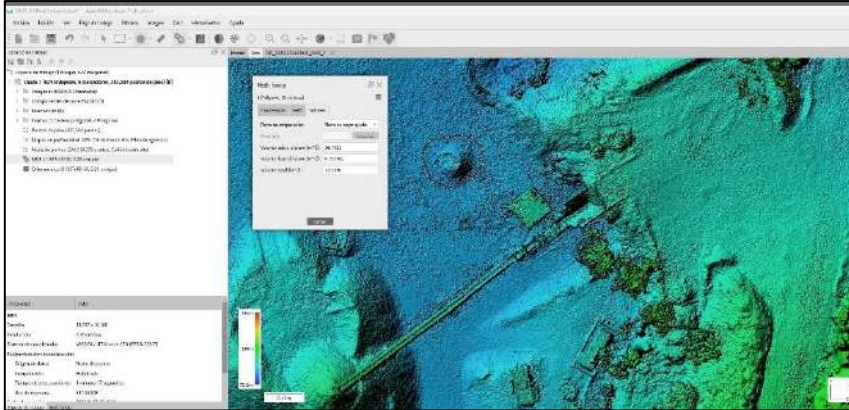


Fig. No.54. Pila # 3 desde MDE de Metashape.

El cálculo volumétrico de la pila de material N.º 3 se realizó empleando el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir del procesamiento fotogramétrico. La delimitación del acopio se efectuó mediante la herramienta de medición de formas, utilizando una cadena poligonal de diez vértices que permitió representar con precisión la extensión superficial del material.

Para el cálculo se adoptó el plano de mejor ajuste como superficie de referencia, metodología que facilita la estimación del nivel base del terreno al compensar pequeñas irregularidades presentes en la zona de emplazamiento.

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

**Volumen sobre el plano:** 26.492 m<sup>3</sup>

**Volumen bajo el plano:** 0.938 m<sup>3</sup>

**Volumen total:** 25.554 m<sup>3</sup>

La reducida diferencia registrada bajo el plano confirma una adecuada definición de la superficie base y evidencia consistencia en el modelo digital utilizado para el análisis.

➤ Pila de material N.º4

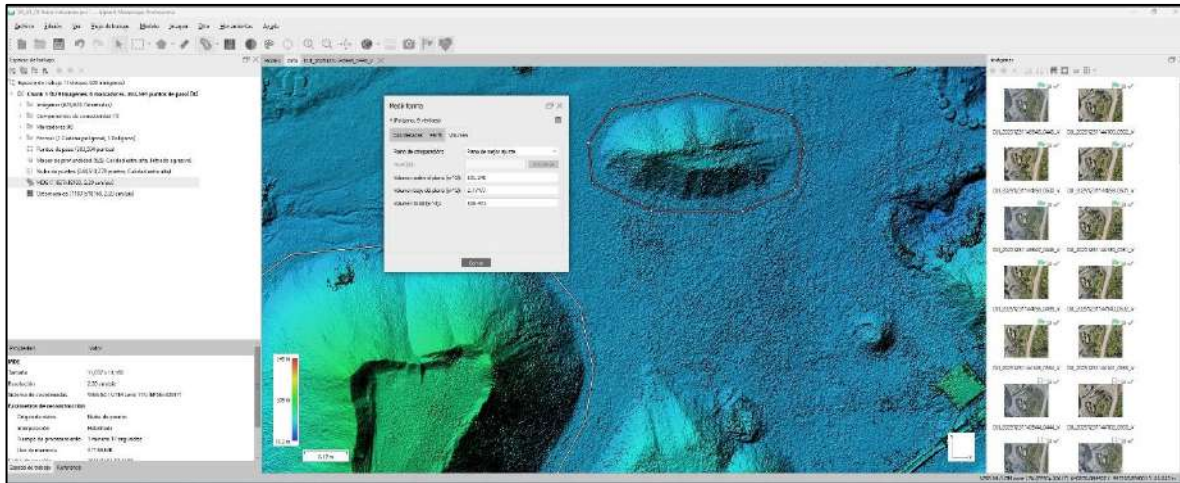


Fig. No.55. Calculo Volumétrico desde MDE de Metashape.

## Obtención de la información

El cálculo volumétrico de la pila de material N.º 4 se efectuó mediante el procesamiento fotogramétrico en el software Agisoft Metashape Professional, utilizando el Modelo Digital de Elevación como base para la estimación.

La delimitación del acopio se realizó mediante una cadena poligonal compuesta por nueve vértices, lo que permitió definir con precisión el perímetro del material y garantizar una adecuada representación geométrica de la superficie analizada.

Para el cálculo se empleó el método del plano de mejor ajuste como superficie de referencia, estrategia que facilita la reconstrucción del terreno base al minimizar las variaciones locales presentes en la zona.

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

**Volumen sobre el plano: 531.246 m<sup>3</sup>**

**Volumen bajo el plano: 2.77477 m<sup>3</sup>**

**Volumen total: 528.471 m³**

La escasa diferencia registrada bajo el plano confirma una correcta definición del nivel de comparación y respalda la confiabilidad del modelo tridimensional generado

#### 4.3.4. Análisis volumétrico global de las pilas

El análisis volumétrico global se realizó a partir de los cálculos individuales obtenidos mediante el procesamiento fotogramétrico en el software Agisoft Metashape Professional, permitiendo cuantificar con precisión el material acopiado dentro del área de estudio.

La integración de los resultados facilita una visión integral del comportamiento espacial de los acopios y proporciona información estratégica para la gestión operativa del sitio.

El volumen total acumulado de las cuatro pilas analizadas asciende aproximadamente a **1,098.97 m<sup>3</sup>**, evidenciando una cantidad significativa de material disponible para las actividades productivas.

Con el propósito de integrar los resultados obtenidos en el análisis individual de cada acopio, se presenta el cuadro resumen de los volúmenes calculados. Esta tabla permite visualizar de manera clara la distribución del material dentro del área de estudio, así como el volumen total disponible.

Tabla 26. Resumen de volúmenes calculados

| Pila                     | Volumen sobre el plano<br>(m <sup>3</sup> ) | Volumen bajo el plano<br>(m <sup>3</sup> ) | Volumen total<br>(m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| Pila 1                   | 26.492                                      | 0.938                                      | 25.554                             |
| Pila 2                   | 12.893                                      | 0.457                                      | 12.436                             |
| Pila 3                   | 531.246                                     | 2.775                                      | 528.471                            |
| Pila 4                   | 535.127                                     | 2.618                                      | 532.509                            |
| <b>TOTAL<br/>GENERAL</b> | <b>1,105.758</b>                            | <b>6.788</b>                               | <b>1,098.970</b>                   |

Como se observa, las pilas 3 y 4 concentran la mayor cantidad de material, representando aproximadamente el 96% del volumen total, mientras que las pilas 1 y 2 corresponden a acopios de menor magnitud.

Importancia dentro del ejercicio profesional

La determinación precisa de volúmenes es fundamental en actividades como:

- ❖ Control de producción
- ❖ Gestión de inventarios
- ❖ Valorización de materiales
- ❖ Planificación operativa
- ❖ Fiscalización de movimientos de tierra

En este contexto, el uso del dron DJI Mavic 3 Enterprise, combinado con procesamiento fotogramétrico, demuestra ser una herramienta tecnológica que optimiza los tiempos de levantamiento, mejora la seguridad en campo y proporciona información estratégica para la toma de decisiones

#### 4.4 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir del levantamiento fotogramétrico realizado con el dron DJI Mavic 3 Enterprise demuestran la viabilidad y confiabilidad del uso de vehículos aéreos no tripulados como herramienta técnica para levantamientos topográficos y análisis volumétricos en entornos dinámicos como canteras de explotación minera. La integración de tecnologías aéreas y terrestres permitió generar productos cartográficos de alta calidad, adecuados para la toma de decisiones técnicas y operativas.

La discusión de los resultados se enfoca en la precisión alcanzada, la estabilidad de los puntos de control terrestre, la calidad de los modelos generados y la aplicabilidad práctica de la información obtenida, destacando especialmente el aporte del análisis volumétrico como elemento clave para la gestión del material acopiado.

##### 4.4.1 Comportamiento y estabilidad de los puntos de control terrestre (GCP)

El análisis de los puntos de control terrestre evidenció que, debido a la naturaleza dinámica de la cantera, varios GCP presentaron desplazamientos entre campañas de medición. Estos desplazamientos estuvieron directamente asociados al movimiento de tierra, tránsito constante de maquinaria pesada y modificaciones continuas del terreno.

La pérdida del Punto de Control N.º1 y el desplazamiento registrado en otros puntos, como el Punto N.º3 y el Punto N.º4, confirman que en proyectos mineros los GCPs no pueden considerarse elementos estáticos a largo plazo. Este comportamiento resalta la importancia de realizar verificaciones periódicas y, cuando sea necesario, la actualización de coordenadas mediante levantamientos GNSS, a fin de preservar la precisión absoluta del modelo fotogramétrico.

La incorporación de puntos auxiliares demostró ser una estrategia efectiva para reforzar la red de control, permitiendo mantener la coherencia geométrica del proyecto aun cuando algunos puntos principales se vieran afectados.

#### 4.4.2 Precisión del modelo fotogramétrico y control de errores

Los errores RMS obtenidos durante el procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape se mantuvieron dentro de rangos aceptables para trabajos de topografía aplicada y estudios volumétricos, evidenciando una adecuada georreferenciación del modelo. La precisión planimétrica y altimétrica alcanzada estuvo directamente relacionada con la correcta distribución de los GCP, su medición mediante GNSS y la altura de vuelo empleada.

La altura de vuelo de aproximadamente 40 metros permitió obtener una elevada resolución espacial, favoreciendo la identificación de detalles y una mayor densidad de la nube de puntos. Esto influyó positivamente en la calidad de los modelos digitales, reduciendo errores de interpolación y mejorando la representación del relieve y de los frentes de explotación.

El control de calidad realizado a través de la evaluación del RMSE confirma que el modelo generado es técnicamente confiable y constituye una base sólida para la ejecución de análisis volumétricos con un alto grado de certidumbre

#### 4.4.3 Análisis de los productos generados y su utilidad práctica

El ortomosaico final permitió una interpretación visual clara y precisa del área de estudio, facilitando la identificación de zonas activas de explotación, caminos operativos, áreas de acopio y límites funcionales. Este producto se consolida como una herramienta eficaz para la planificación y el monitoreo continuo de las actividades dentro de la cantera.

Por su parte, el Modelo Digital del Terreno representó fielmente la topografía del sitio, sirviendo como base para la generación de curvas de nivel y el cálculo volumétrico de los acopios.

El análisis de las cuatro pilas de material permitió cuantificar con precisión el volumen disponible dentro del área de estudio, proporcionando información estratégica para el control de inventarios, la programación de la producción y la planificación de futuras fases de explotación. La consistencia observada entre la geometría de los acopios y los volúmenes calculados evidencia la confiabilidad del modelo tridimensional generado.

Desde una perspectiva operativa, la posibilidad de obtener mediciones volumétricas precisas en menor tiempo y con mayor cobertura espacial representa una ventaja significativa frente a los métodos topográficos convencionales, especialmente en entornos donde las condiciones del terreno cambian constantemente.

#### 4.4.4 Limitaciones observadas y consideraciones técnicas

A pesar de los resultados satisfactorios, se identificaron ciertas limitaciones propias de la metodología aplicada. Las condiciones climáticas, especialmente el viento, influyeron en la planificación de los vuelos y en la necesidad de realizar misiones de corta duración. Asimismo, la constante alteración del terreno obligó a una gestión activa de los puntos de control terrestre.

Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que refuerzan la necesidad de aplicar buenas prácticas, tales como la verificación frecuente de GCP, la correcta planificación de vuelos y el uso combinado de drones y GNSS para garantizar la precisión y confiabilidad de los productos finales.

#### 4.4.5 Discusión general

En términos generales, los resultados confirman que la fotogrametría con drones, cuando se apoya en una red de control terrestre correctamente establecida y en procedimientos técnicos rigurosos, constituye una herramienta altamente eficiente y precisa para levantamientos topográficos y análisis volumétricos en proyectos mineros.

La experiencia desarrollada en la cantera Rock Industries, S.A. demuestra que el uso de drones no sustituye los métodos tradicionales, sino que los complementa, optimizando tiempos de levantamiento, reduciendo riesgos en campo y mejorando la calidad de la información geoespacial empleada para la toma de decisiones.

En este contexto, la fotogrametría aérea se posiciona como una tecnología clave en la modernización del ejercicio profesional del ingeniero en topografía, permitiendo obtener información confiable, actualizada y técnicamente robusta para la gestión eficiente de proyectos extractivos.

## **CAPÍTULO V**

# **CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN**

## Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones generales

1. La aplicación de la fotogrametría aérea mediante drones demostró ser una herramienta técnica eficiente y confiable para la realización de levantamientos topográficos en entornos dinámicos como canteras de explotación minera. La metodología empleada permitió obtener productos cartográficos precisos, tales como ortomosaicos, modelos digitales del terreno y cálculos volumétricos, adecuados para la toma de decisiones técnicas.
2. El uso del dron DJI Mavic 3 Enterprise, operando a una altura de vuelo aproximada de 40 metros y procesado mediante el software Agisoft Metashape, permitió alcanzar una alta resolución espacial, favoreciendo la generación de modelos tridimensionales detallados y una adecuada representación del relieve del terreno. Esto confirmó la idoneidad de los drones multirrotor para levantamientos de detalle en áreas operativas de extensión moderada.
3. La correcta planificación del vuelo, la calibración de la cámara RGB y el adecuado procesamiento fotogramétrico fueron factores determinantes para la calidad del modelo final, influyendo directamente en la reducción de errores y en la consistencia geométrica de los productos generados.
4. La implementación de una red de Puntos de Control Terrestre (GCPs), medida mediante estación GNSS, resultó fundamental para garantizar la georreferenciación absoluta y la precisión planimétrica y altimétrica del levantamiento. El análisis de los desplazamientos detectados evidenció que, en proyectos mineros, los GCPs requieren verificación y actualización periódica para mantener la confiabilidad del modelo.
5. La combinación de levantamientos aéreos con drones y mediciones terrestres de alta precisión mediante GNSS se consolidó como una estrategia clave para asegurar la confiabilidad de los resultados, especialmente en áreas con movimiento constante de tierra y tránsito de maquinaria pesada.

6. Los errores RMS obtenidos durante la evaluación del modelo fotogramétrico se mantuvieron dentro de rangos aceptables para trabajos de topografía aplicada y análisis volumétricos, validando la metodología utilizada y la calidad técnica de los productos generados.
7. El análisis volumétrico de las cuatro pilas de material permitió cuantificar con precisión el volumen disponible dentro del área de estudio, evidenciando la capacidad de la fotogrametría aérea para generar información tridimensional confiable en entornos mineros. Los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico relevante para la planificación operativa, el control de inventarios y la toma de decisiones estratégicas.
8. La experiencia desarrollada en la cantera Rock Industries, S.A. permitió comprobar que la fotogrametría con drones no sustituye los métodos topográficos tradicionales, sino que los complementa, optimizando tiempos de levantamiento, reduciendo riesgos en campo y mejorando la eficiencia operativa.
9. La aplicación de tecnologías fotogramétricas con drones dentro del ejercicio profesional del ingeniero en topografía representa un avance significativo en la modernización del sector, permitiendo ejecutar levantamientos más seguros, rápidos y precisos en comparación con métodos tradicionales.

## 5.2 Recomendaciones para la empresa y profesionales del sector

1. Se recomienda a Rock Industries, S.A. implementar de manera sistemática el uso de drones para el monitoreo periódico de la cantera, especialmente para el control de volúmenes, seguimiento de frentes de explotación y evaluación de taludes, estableciendo campañas de vuelo con frecuencias definidas según la intensidad de las operaciones.
2. Es recomendable realizar verificaciones periódicas de los Puntos de Control Terrestre, especialmente en zonas de alto tránsito o movimiento de material, a fin de evitar errores acumulativos en la georreferenciación de los modelos fotogramétricos.
3. Se sugiere complementar los GCPs principales con puntos auxiliares estratégicamente ubicados que permitan reforzar la red de control y mejorar la estabilidad geométrica del proyecto a lo largo del tiempo.
4. Para profesionales del sector topográfico y geoespacial, se recomienda adoptar metodologías integradas que combinen drones, GNSS y software fotogramétrico especializado, garantizando así productos con respaldo técnico, legal y normativo.
5. Es fundamental que los operadores de drones cumplan con la normativa vigente establecida por la Autoridad Aeronáutica Civil de Panamá, asegurando que las operaciones se realicen dentro de un marco legal, seguro y profesional.
6. Se recomienda realizar levantamientos fotogramétricos periódicos para mantener actualizado el balance volumétrico de los acopios, facilitando la planificación de la producción y reduciendo la incertidumbre en la estimación de reservas.

### 5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones

1. Se recomienda desarrollar estudios comparativos entre levantamientos fotogramétricos realizados con drones multirrotor y drones de ala fija, evaluando diferencias en precisión, cobertura, costos y eficiencia operativa en proyectos mineros de mayor extensión.
2. Futuras investigaciones podrían incorporar el uso de sensores adicionales, como cámaras multiespectrales o sistemas LiDAR, con el fin de evaluar su aporte en la generación de modelos digitales de mayor precisión y en el análisis estructural de taludes.
3. Se sugiere profundizar en el análisis del impacto de variables como la altura de vuelo, el traslape longitudinal y transversal, y las condiciones meteorológicas en la precisión final del modelo fotogramétrico.
4. Asimismo, se recomienda estudiar la integración de modelos fotogramétricos con Sistemas de Información Geográfica para el análisis temporal de cambios volumétricos y la gestión integral de canteras y proyectos mineros.
5. Finalmente, se propone investigar el uso de drones como herramienta permanente de monitoreo ambiental, evaluando su aplicación en el control de áreas intervenidas y procesos de recuperación ambiental.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Normativa y legislación

Autoridad Aeronáutica Civil de Panamá. (2021). Norma Aeronáutica AAC/DG/DSA/01-2021 para la operación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). Resolución N.º 004-2021-NRA-DG-AAC. Gaceta Oficial N.º 29276.

Autoridad Aeronáutica Civil de Panamá. (2021). Regulación y procedimientos para la operación de drones en la República de Panamá. <https://www.aeronautica.gob.pa>

### Libros técnicos

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014). Elements of photogrammetry with applications in GIS (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Kraus, K. (2007). Photogrammetry: Geometry from images and laser scans (2nd ed.). Walter de Gruyter.

Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2017). Elementary surveying: An introduction to geomatics (14th ed.). Pearson Education.

ISPRS (2023) hace referencia a informes técnicos y publicaciones recientes de la International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, organización líder en el tema.

Turner & Lucieer (2022) son autores reales con publicaciones reconocidas sobre drones y fotogrametría.

#### Artículos científicos

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*. CRC Press.

Nex, F., & Remondino, F. (2019). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

#### Software y equipos

Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape Professional Edition: User Manual*. <https://www.agisoft.com>

DJI. (2023). *DJI Mavic 3 Enterprise technical specifications*. <https://www.dji.com>

#### Referencias de páginas web

Autoridad Aeronáutica de Panamá

Autoridad Aeronáutica Civil de Panamá. (s. f.). *Normativa y lineamientos para la operación de drones en Panamá*.

[https://www.aeronautica.gob.pa/drones/datos/textos/drones-editar\\_contenido.html](https://www.aeronautica.gob.pa/drones/datos/textos/drones-editar_contenido.html)

#### Legislación y regulación de drones

UAV Coach. (s. f.). *Drone laws in Panama*.

<https://uavcoach.com/drone-laws-panama/>

#### Página institucional de la empresa

Rock Industries, S.A. (s. f.). *Sitio web oficial*.

<https://www.rockinsa.com/>