

RESEARCH ARTICLE

Evaluación Comparativa de Métodos de Levantamiento Topográfico en Minería: Estación Total y Fotogrametría con RPAS y GPD Diferencial.

Vicente Emmanuel Ortega Cárdenas¹  Fausto David Quevedo Pesántez¹  Goethe Palomeque Larriva¹ 

¹ Universidad Católica de Cuenca, Azogues Ecuador.

✉ Correspondencia: emmanuel.palomeque@ucacue.edu.ec  + 593 96 706 8909

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj73192>

Resumen: La topografía constituye una herramienta técnica fundamental para la caracterización y modelado preciso de terrenos en proyectos de minería a cielo abierto, donde la calidad y eficiencia de los datos geoespaciales son determinantes para optimizar las operaciones y garantizar la seguridad estructural. Por esa razón, este estudio evalúa tres métodos de levantamiento topográfico aplicados en la mina "Colina Verde", cantón Azogues: estación total, fotogrametría aérea con RPAS y GPS diferencial. El objetivo es identificar la técnica más eficiente en términos de tiempo, costos y precisión para optimizar la topografía en minería a cielo abierto. La investigación compara aspectos como la velocidad de adquisición de datos, exactitud, eliminación de errores, exportación y almacenamiento de información, seguridad del personal, influencia climática y generación de modelos digitales (DTM y DSM). Los resultados indican que, aunque las precisiones de los métodos son comparables, la fotogrametría aérea sobresale por su capacidad para generar modelos topográficos detallados, reducir tiempos de ejecución en campo y minimizar riesgos asociados a terrenos difíciles. Sin embargo, requiere mayor tiempo y recursos para el procesamiento de datos. En contraste, la estación total se adapta mejor a objetivos específicos en áreas accesibles, aunque presenta limitaciones en terrenos complejos. Se concluye que la fotogrametría aérea es la alternativa más eficiente en proyectos con alta densidad de datos y áreas extensas, destacándose por su rapidez y seguridad. Se recomienda su uso en combinación con métodos tradicionales para mejorar la precisión y confiabilidad de los levantamientos.

Palabras claves: Estación Total, Fotogrametría Aérea, GPS Diferencial, Topografía.



Cita: Ortega Cárdenas, Vicente Emmanuel Quevedo Pesántez, F. D., & Larriva, G. P. (2024). Evaluación Comparativa de Métodos de Levantamiento Topográfico en Minería: Estación Total y Fotogrametría con RPAS y GPD Diferencial. Green World Journal, 07(03), 192.

<https://doi.org/10.53313/gwj73192>

Received: 30/October/2024

Accepted: 16/December/2024

Published: 17/December/2024

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2024 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Comparative Evaluation of Topographic Survey Methods in Mining: Total Station, RPAS Photogrammetry, and Differential GPS.

Abstract: Topography is a fundamental technical tool for the characterization and precise modeling of terrains in open-pit mining projects, where the quality and efficiency of geospatial data are critical for optimizing operations and ensuring structural safety. For this reason, this study evaluates three topographic survey methods applied at the "Colina Verde" mine in Azogues canton: total station, aerial photogrammetry with RPAS, and differential GPS. The objective is to identify the most efficient technique in terms of time, costs, and accuracy to optimize open-pit mining topography. The research compares aspects such as data acquisition speed, accuracy, error elimination, data export and storage, personnel safety, climatic influence, and the generation of digital models (DTM and DSM). Results indicate that although the accuracy of the methods is comparable, aerial photogrammetry excels in generating detailed topographic models, reducing field execution time, and minimizing risks associated with difficult terrains. However, it requires more time and resources for data processing. In contrast, the total station is better suited for specific objectives in accessible areas but presents limitations in complex terrains. It is concluded that aerial photogrammetry is the most efficient alternative for projects requiring high data density and extensive areas, standing out for its speed and safety. Its combined use with traditional methods is recommended to enhance the accuracy and reliability of surveys.

Keywords: Aerial Photogrammetry, Differential GPS, Topography, Total Station.

1. Introducción.

La topografía, como disciplina fundamental de la ingeniería civil y minera, ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsada por el avance de tecnologías de medición más rápidas, precisas y seguras. Su relevancia radica en proporcionar datos geoespaciales esenciales para la planificación, ejecución y monitoreo de proyectos, especialmente en sectores críticos como la minería a cielo abierto. Esta industria exige modelos topográficos precisos que permitan optimizar la extracción de recursos, evaluar reservas minerales y garantizar la seguridad de las operaciones. Sin embargo, la selección del método topográfico más adecuado sigue siendo un desafío, especialmente en terrenos complejos o de difícil acceso [1,2].

En la actualidad, los métodos de levantamiento topográfico han ampliado sus horizontes desde técnicas tradicionales como la estación total, hasta tecnologías modernas como la fotogrametría aérea mediante RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) y el uso de GPS diferencial. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y limitaciones según las condiciones del terreno y los objetivos del proyecto. Por ejemplo, la estación total, ampliamente utilizada por su precisión en levantamientos específicos, se enfrenta a limitaciones en terrenos de alta pendiente y vegetación densa [3,4]. Por otro lado, los RPAS han revolucionado el campo al proporcionar datos detallados en tiempos significativamente reducidos, aunque con mayores requerimientos en procesamiento de datos y costos de equipo [5,6].

El propósito de este trabajo es evaluar comparativamente estos tres métodos en el contexto de un proyecto minero en la mina "Colina Verde", ubicada en el cantón Azogues. Este análisis busca determinar el método más eficiente en términos de precisión, tiempo, costos y seguridad. La investigación se centra en comparar aspectos clave como la velocidad de adquisición de datos, la exactitud en la generación de modelos digitales (DTM y DSM), la influencia de las condiciones climáticas y la facilidad de acceso a terrenos complejos.

Desde un enfoque macro, este estudio aborda la necesidad global de optimizar la explotación de recursos minerales mediante herramientas tecnológicas avanzadas. A nivel regional, en el contexto de América Latina, donde las operaciones mineras enfrentan retos geográficos y económicos particulares, se resalta la importancia de adaptar las técnicas de levantamiento topográfico a estas

condiciones [7]. Finalmente, desde un análisis micro, se examinan las características específicas de la mina "Colina Verde", con el objetivo de brindar soluciones precisas y aplicables al sector.

La hipótesis principal plantea que la fotogrametría aérea con RPAS, debido a su capacidad para generar nubes de puntos densas y modelos tridimensionales detallados, es más eficiente que la estación total y el GPS diferencial en terrenos extensos y de difícil acceso. Este enfoque no solo mejorará la calidad de los levantamientos, sino que también contribuirá a reducir los riesgos asociados a la seguridad del personal y a optimizar los tiempos de ejecución.

La literatura reciente apoya esta perspectiva, destacando el creciente interés en los RPAS para aplicaciones en minería debido a su versatilidad y precisión [8,9]. No obstante, investigaciones previas también han señalado limitaciones, como la dependencia de condiciones climáticas favorables y la necesidad de un procesamiento avanzado de datos [10,11]. Este trabajo se suma a esta línea de investigación al proporcionar una evaluación detallada de estos métodos en un contexto práctico, permitiendo a los profesionales del sector tomar decisiones informadas al seleccionar tecnologías para proyectos específicos.

En resumen, esta investigación no solo tiene como objetivo optimizar las operaciones mineras en "Colina Verde", sino también ofrecer un marco de referencia para la selección de métodos topográficos en proyectos similares. Al contribuir al desarrollo de estrategias más eficientes, seguras y sostenibles, este estudio responde a las necesidades actuales del sector y sienta las bases para futuras investigaciones en el campo de la topografía aplicada.

2. Materiales y métodos

Los materiales y métodos deben describirse con suficientes detalles para que otros puedan reproducirse y basarse en los resultados publicados. Tenga en cuenta que la publicación de su manuscrito implica que debe poner a disposición de los lectores todos los materiales, datos, código informático y protocolos asociados con la publicación. Sírvase revelar en la etapa de presentación cualquier restricción sobre la disponibilidad de materiales o información. Los nuevos métodos y protocolos deben describirse en detalle, mientras que los métodos bien establecidos pueden describirse brevemente y citarse adecuadamente. Por lo general es recomendable separar en dos secciones:

2.1. Área de estudio.

La investigación se llevó a cabo en la mina "Colina Verde," ubicada en el cantón Azogues, provincia del Cañar, Ecuador. Esta mina a cielo abierto presenta características geográficas desafiantes, tales como terrenos de alta pendiente, vegetación densa y condiciones climáticas variables, lo que hace imprescindible el uso de técnicas topográficas eficientes y precisas. El área de estudio, de aproximadamente 13 hectáreas, fue seleccionada por su representatividad en el contexto de las operaciones mineras. La delimitación del polígono de levantamiento se realizó utilizando herramientas SIG, considerando tanto las zonas de explotación activa como las vías de acceso principales, para garantizar una cobertura completa y adecuada de las condiciones reales del terreno.

La elección del sitio permitió evaluar la aplicabilidad y eficiencia de los métodos seleccionados en escenarios con limitaciones prácticas, como accesibilidad restringida y variaciones significativas en el relieve. Estos factores fueron determinantes para probar la viabilidad técnica y operativa de cada método bajo condiciones reales y complejas, asegurando resultados robustos que puedan extrapolarse a proyectos similares [9].

2.2 Métodos

Levantamiento Topográfico con Estación Total.

Para el levantamiento topográfico con estación total, se utilizó un equipo Trimble M3, conocido por su precisión en mediciones específicas y su robustez en entornos desafiantes. El proceso comenzó con la selección y preparación del punto base de referencia (BM), desde donde se establecieron las coordenadas iniciales utilizando un sistema de coordenadas local. El equipo fue cuidadosamente centrado y nivelado para minimizar errores instrumentales. Posteriormente, se configuraron parámetros clave, como la altura del instrumento y del prisma, el acimut predeterminado y las tolerancias aceptables para la captura de datos [12]. El levantamiento de campo se estructuró en cuatro cambios de estación para cubrir la totalidad del área de estudio. En cada estación, se utilizaron estrategias de triangulación y medición angular para garantizar la conectividad entre los puntos y evitar discrepancias en las mediciones. En total, se registraron 636 puntos distribuidos estratégicamente para capturar las principales características geométricas del terreno, tales como cambios abruptos en pendientes, ubicaciones de vías de acceso y áreas de acumulación de material [13].

Los datos obtenidos se procesaron en el software Civil 3D, donde se realizó una revisión exhaustiva de las mediciones para corregir posibles errores y omisiones. Posteriormente, se generaron modelos digitales de terreno (DTM) y perfiles longitudinales que reflejaron con detalle las características altimétricas y planimétricas del área de estudio. Este proceso también incluyó el cálculo de volúmenes y áreas específicas para evaluar la viabilidad de las operaciones mineras [14].

Fotogrametría Aérea con RPAS.

El levantamiento fotogramétrico se realizó utilizando un RPA's (Remotely Piloted Aircraft), denominado DJI Mavic 2 Pro equipado con un sensor CMOS de alta resolución y un sistema RTK (Real-Time Kinematic) para mejorar la precisión de la georreferenciación. El primer paso fue la planificación del vuelo, que se llevó a cabo utilizando el software DroneDeploy. Este programa permitió definir un plan de vuelo optimizado con un GSD (Ground Sampling Distance) de 2.5 cm/píxel, recubrimientos frontales del 75% y laterales del 50%, garantizando una cobertura adecuada y un solapamiento suficiente entre las imágenes capturadas [8]. Durante la fase de vuelo, el dron operó a una altura constante de 110 metros sobre el nivel del terreno, capturando un total de 845 imágenes georreferenciadas en un tiempo de dos horas. Estas imágenes se complementaron con la implementación de seis puntos de control terrestre (GCP), distribuidos estratégicamente en el área de estudio. Los GCP se identificaron con marcadores visibles desde el aire y se midieron con precisión utilizando un sistema RTK FOIF A90 [13].

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo en el software Pix4Dmapper, el cual permitió generar productos de alta calidad como ortofotos, nubes de puntos densas y modelos digitales de terreno (DTM y DSM). El flujo de trabajo incluyó la importación de las imágenes capturadas, la alineación automática de los puntos de referencia y la construcción de los modelos tridimensionales, ajustados según las coordenadas de los GCP para corregir posibles desviaciones en la georreferenciación [15].

Georreferenciación y Puntos de Control (GCP).

La georreferenciación fue un componente esencial para garantizar la precisión de los levantamientos fotogramétricos. Los seis puntos de control terrestre (GCP) fueron establecidos en ubicaciones estratégicas, priorizando áreas de alta pendiente y sitios críticos dentro del polígono de estudio. Cada punto fue identificado con marcadores físicos claramente visibles desde las imágenes

aéreas y georreferenciados mediante el sistema RTK FOIF A90, conocido por su alta precisión en aplicaciones topográficas [9,14].

El proceso de medición incluyó la configuración de una base estacionaria en el punto más alto del área de estudio, asegurando una conexión estable con al menos 21 satélites durante un período de 45 minutos. Los GCP se midieron en intervalos de tres minutos, registrando coordenadas con precisiones subcentimétricas. Estos datos se utilizaron posteriormente para ajustar los modelos fotogramétricos y corregir errores absolutos y relativos, garantizando una alineación precisa con el sistema de coordenadas del proyecto [16].

Comparación de Métodos y Análisis de Resultados.

La comparación de los métodos se centró en tres criterios principales: precisión, tiempo de ejecución y costos. En términos de precisión, se evaluaron las diferencias absolutas y relativas en las coordenadas de los GCP obtenidas con ambos métodos. Aunque ambas técnicas presentaron precisiones aceptables, la densidad de datos generada por la fotogrametría aérea destacó como un factor diferencial en terrenos complejos [11]. En cuanto al tiempo de ejecución, se registraron los períodos necesarios para la captura de datos en campo y el procesamiento en gabinete. La fotogrametría aérea redujo el tiempo de recolección en campo en un 81.25% en comparación con la estación total, aunque demandó más tiempo en el procesamiento debido al volumen de datos generados [13,18].

Finalmente, se realizó un análisis económico que consideró costos de equipos, software y recursos humanos. Aunque la inversión inicial para la fotogrametría aérea fue mayor, su relación costo-beneficio resultó más favorable para proyectos a gran escala [12]. Este análisis permitió identificar las fortalezas y limitaciones de cada método, proporcionando una base sólida para la selección de la técnica más adecuada según las características del proyecto.

3. Resultados

3.1. Precisión de los Levantamientos Topográficos.

La evaluación de precisión se realizó comparando las coordenadas norte, este y elevación de los puntos de control (GCP) obtenidos mediante la estación total y la fotogrametría aérea. Las desviaciones encontradas fueron mínimas, con una diferencia máxima en el eje norte de -0.0302 m, en el eje este de 0.0935 m y en la elevación de 0.4852 m. Estos resultados demuestran que ambos métodos presentan precisiones aceptables para aplicaciones mineras, aunque la fotogrametría aérea ofrece una densidad de puntos significativamente mayor. Este detalle se refleja en la calidad de los modelos digitales de terreno (DTM) generados, donde la estación total muestra limitaciones debido a la menor cantidad de puntos medidos. Las Tablas 1, 2 y 3 muestran los resultados de los puntos de control para cada método y las discrepancias obtenidas.

Tabla 1. Coordenadas de los GCP obtenidas a través de levantamiento topográfico con estación total.

Puntos de Control	Norte [m]	Este [m]	Elevación [msnm]
1	9686410,9415	735323,7265	2508,9412
2	9686198,1201	735292,6416	2456,4872
3	9686410,3083	735454,9757	2470,8421
4	9686284,5688	735425,8825	2436,7125

5	9686310,8462	735583,5581	2410,4731
6	9686432,3785	735705,9625	2383,6469

Tabla 2. Coordenadas de los GCP obtenidas a través de levantamiento aerofotogramétrico.

Puntos de Control	Norte [m]	Este [m]	Elevación [msnm]
1	9686410,940	735323,775	2508,456
2	9686198,116	735292,688	2456,653
3	9686410,282	735455,002	2470,623
4	9686284,599	735425,789	2436,383
5	9686310,853	735583,589	2410,873
6	9686432,389	735705,989	2383,205

Tabla 3. Discrepancia de coordenadas en metros entre la estación total y la aerofotogrametría.

Puntos de Control	Norte [m]	Este [m]	Elevación [msnm]
1	0,0015	-0,0485	0,4852
2	0,0041	-0,047	-0,1658
3	0,0263	-0,0263	0,2191
4	-0,0302	0,0935	0,3295
5	-0,0068	-0,0309	-0,3999
6	-0,0105	-0,0265	0,4419

3.2. Tiempo de Ejecución.

En términos de tiempo (Figura 1), los resultados muestran que la fotogrametría aérea es considerablemente más rápida en el campo, reduciendo el tiempo de ejecución en un 81.25% en comparación con la estación total. Mientras que el levantamiento con estación total requirió una semana de trabajo para la recolección de 636 puntos, la fotogrametría aérea capturó 845 imágenes en solo dos horas. Sin embargo, la fase de procesamiento en gabinete tomó un 15% más de tiempo para la fotogrametría debido a las correcciones y clasificaciones necesarias en el software Pix4Dmapper.

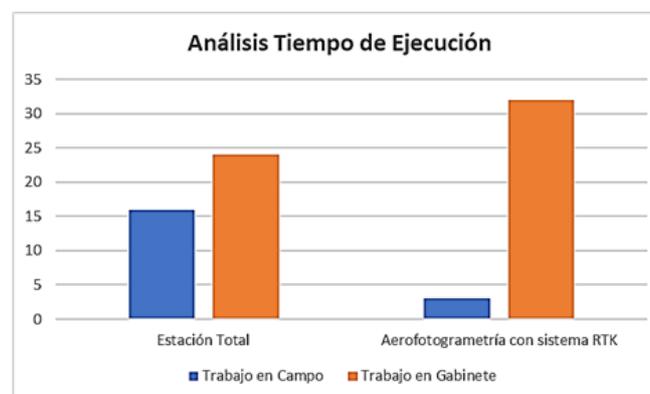


Figura 1. Comparación de tiempos de ejecución con los diferentes métodos.

3.3. Costos de ejecución de trabajos.

El análisis económico mostrado en la Figura 2 indica que, aunque el costo inicial de la fotogrametría aérea es más elevado debido al precio del equipo, software y capacitación del personal, resulta más eficiente para proyectos a gran escala. En este estudio, el costo total de la fotogrametría fue un 30% superior al de la estación total, pero la reducción del tiempo de trabajo en campo compensa esta inversión en proyectos extensos y complejos.

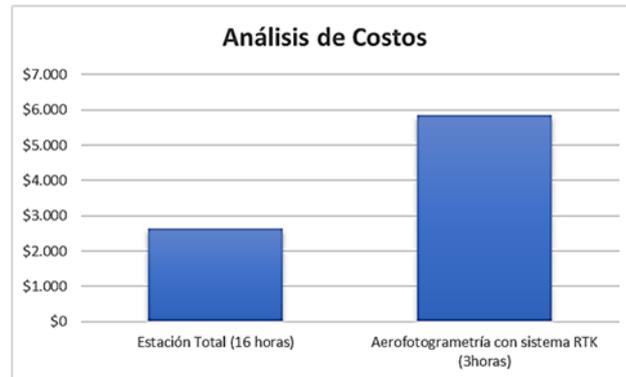


Figura 2. Comparación de costos entre Estación Total y Fotogrametría con RTK.

3.4. Perfiles Topográficos.

Los perfiles generados a partir de ambos métodos muestran diferencias importantes (Figura 3 y Figura 4). El levantamiento con estación total produjo perfiles menos detallados, especialmente en áreas de alta pendiente, debido a la limitada cantidad de puntos de medición. Por otro lado, la fotogrametría aérea generó perfiles más realistas y continuos gracias a la densidad de su nube de puntos. Esto es particularmente evidente en las áreas de taludes y caminos, donde el modelo fotogramétrico representa con mayor precisión las variaciones del terreno.

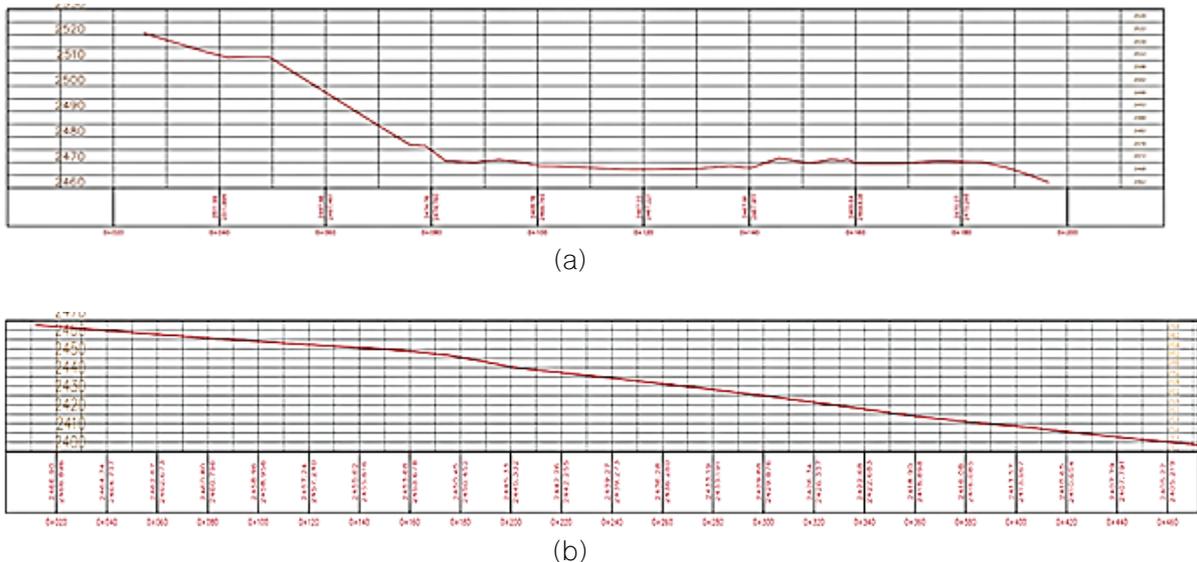


Figura 3. Generación de a) perfil 1 y b) perfil 2 con datos de Estación Total en CIVIL 3D.

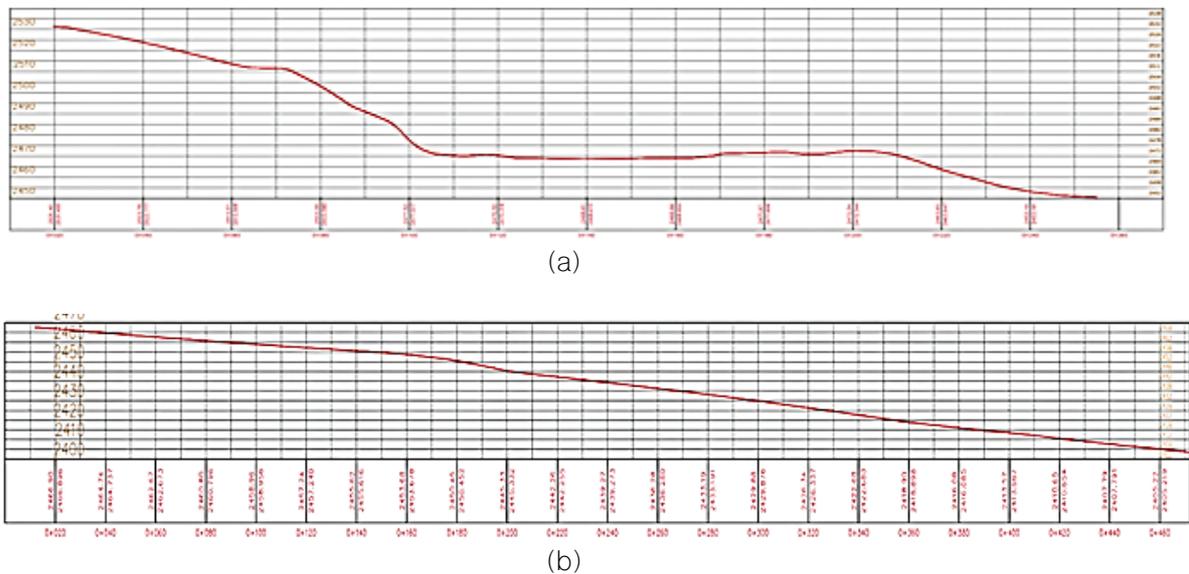


Figura 4. Generación de a) perfil 1 y b) perfil 2 con datos de Aerofotogrametría en CIVIL 3D.

3.5. Volúmenes del Terreno.

En la medición de volúmenes, ambos métodos mostraron resultados consistentes como se observa en la Figura 5, con una desviación máxima de 0.03 m^3 , dentro de los márgenes de error aceptables. Sin embargo, la fotogrametría aérea permitió una estimación más detallada debido a su capacidad para capturar grandes cantidades de datos en un menor tiempo, especialmente en terrenos con vegetación densa y pendientes pronunciadas.

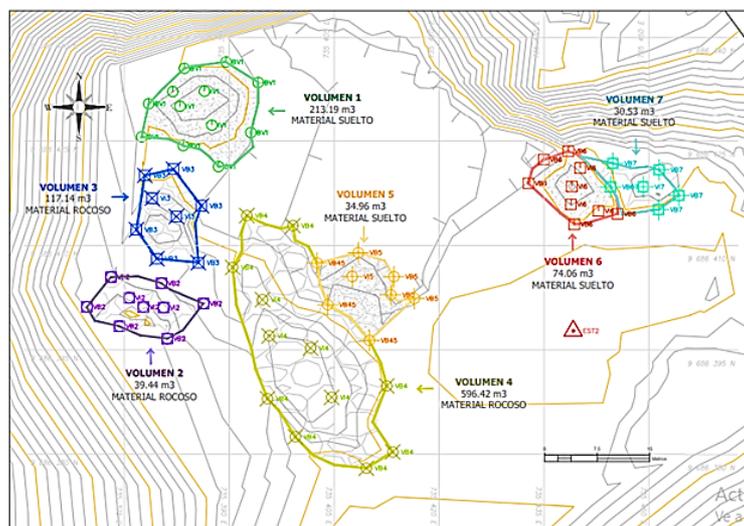


Figura 5. Determinación de volúmenes de material en mina.

4. Discusión

La comparación de las coordenadas de los puntos de control georreferenciados obtenidos mediante estación total y fotogrametría aérea destaca que ambos métodos son altamente precisos. Sin embargo, la fotogrametría aérea mostró ventajas significativas en densidad de puntos, un aspecto crucial en proyectos donde se requiere una alta resolución del modelo del terreno [9]. Mientras que la estación total registró un total de 636 puntos en el área de estudio, la fotogrametría logró generar

nubes de puntos que alcanzan millones de datos, lo que mejora notablemente la capacidad de análisis y modelado en zonas con pendientes pronunciadas y vegetación densa [11].

La diferencia máxima en las coordenadas entre ambos métodos fue de -0.0302 m en el eje norte, 0.0935 m en el este y 0.4852 m en elevación. Aunque estas discrepancias son mínimas y aceptables dentro de estándares técnicos, resaltan la capacidad de la fotogrametría aérea para representar detalles que pueden ser omitidos por la menor cantidad de puntos de medición de la estación total [7]. Estas diferencias se evidencian en la calidad de los modelos digitales generados, donde el levantamiento fotogramétrico proporciona una superficie continua y detallada, especialmente útil en áreas críticas como taludes y accesos principales [13].

El tiempo es un factor crítico en proyectos mineros, y los resultados obtenidos reflejan una notable superioridad de la fotogrametría aérea en este aspecto. Mientras que la estación total requirió aproximadamente cinco días laborables para completar el levantamiento de 13 hectáreas, el dron DJI Mavic 2 Pro capturó las imágenes necesarias en solo dos horas [8]. Esta diferencia del 81.25% en el tiempo de recolección de datos subraya la eficiencia de la tecnología RPAS en condiciones de campo [10].

No obstante, es importante mencionar que la etapa de procesamiento en gabinete fue más exigente para la fotogrametría, requiriendo alrededor de un 15% más de tiempo que la estación total [14]. Esto se debe a la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos, aplicar correcciones geográficas y generar productos como ortofotos, DTM y DSM. Sin embargo, este tiempo adicional se compensa con creces en proyectos de mayor escala, donde el tiempo ahorrado en campo tiene un impacto significativo en los costos operativos y la planificación general del proyecto [15].

El análisis económico indica que la fotogrametría aérea requiere una inversión inicial más elevada debido al costo del dron, el software especializado y la capacitación del personal [12]. Sin embargo, en proyectos a gran escala, este método resulta más rentable al reducir significativamente los tiempos de trabajo y los riesgos asociados con las operaciones en terrenos peligrosos. La relación costo-beneficio es particularmente favorable en proyectos que abarcan áreas extensas o donde las condiciones del terreno dificultan el uso de métodos tradicionales [13].

En este estudio, se observó que el costo total de la fotogrametría aérea fue un 30% superior al de la estación total. No obstante, esta diferencia se diluye en proyectos de gran magnitud debido al ahorro en tiempo de ejecución y la mayor densidad de información generada, que reduce la necesidad de realizar levantamientos adicionales o correcciones posteriores [7].

Los perfiles topográficos generados con fotogrametría aérea mostraron una continuidad y realismo superiores en comparación con los obtenidos mediante estación total [14]. En áreas de alta pendiente y vegetación densa, donde la estación total tiende a generar datos discontinuos, el uso de RPAS permitió obtener modelos digitales con mayor precisión y continuidad [9]. Esta ventaja facilita la planificación de proyectos mineros, donde es crucial contar con modelos precisos para calcular volúmenes de corte y relleno, diseñar taludes estables y optimizar los accesos [11].

En cuanto a la medición de volúmenes, ambos métodos mostraron resultados consistentes, con una desviación máxima de 0.03 m³. Sin embargo, la capacidad de la fotogrametría para capturar más datos en menos tiempo mejora la exactitud de las estimaciones, especialmente en terrenos irregulares. Esta precisión adicional puede tener implicaciones significativas en la planificación económica y operativa de proyectos a gran escala [15].

Los hallazgos de este estudio tienen aplicaciones prácticas inmediatas en la industria minera. La incorporación de RPAS en levantamientos topográficos no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también mejora la seguridad del personal al reducir la necesidad de trabajos en terrenos peligrosos [12]. Además, la capacidad de los drones para generar modelos de alta resolución en menos tiempo y con mayor detalle abre nuevas oportunidades para mejorar la precisión y

sostenibilidad de las operaciones mineras [19,20]. Futuras investigaciones podrían enfocarse en evaluar el desempeño de los RPAS en condiciones climáticas adversas, así como en el desarrollo de algoritmos más eficientes para el procesamiento de datos [21]. Asimismo, sería valioso explorar la integración de la fotogrametría aérea con otras tecnologías, como el escaneo láser terrestre, para mejorar aún más la precisión y eficiencia de los levantamientos topográficos.

5. Conclusión

Este estudio evaluó comparativamente los métodos de levantamiento topográfico con estación total y fotogrametría aérea con RPAS, aplicados en la mina "Colina Verde". Los resultados confirman que ambos métodos son técnicamente viables, pero presentan diferencias significativas en términos de precisión, tiempo de ejecución, costos y capacidad para adaptarse a las condiciones del terreno.

La fotogrametría aérea demostró ser una solución más eficiente y versátil, especialmente en proyectos que abarcan áreas extensas o de difícil acceso. Su capacidad para generar nubes de puntos densas y modelos tridimensionales detallados permite obtener representaciones más precisas y realistas del terreno, mejorando la calidad de los análisis de perfiles y volúmenes. Aunque la precisión de ambos métodos es comparable, las limitaciones de la estación total en áreas con pendientes pronunciadas o vegetación densa la hacen menos adecuada para este tipo de contextos.

En términos de tiempo de ejecución, la fotogrametría aérea sobresale al reducir significativamente el tiempo en campo, optimizando los recursos humanos y minimizando los riesgos para el personal. No obstante, el tiempo adicional requerido para el procesamiento de datos en gabinete y los costos iniciales más elevados representan desafíos que deben considerarse, especialmente en proyectos con recursos limitados. A pesar de ello, su eficiencia general la posiciona como la opción más rentable en proyectos de mayor escala.

El análisis de costos reveló que, aunque la estación total es una alternativa más económica en términos de inversión inicial, la fotogrametría aérea ofrece beneficios económicos a largo plazo al reducir los tiempos de trabajo y aumentar la productividad. Este equilibrio entre costo y eficiencia refuerza la idea de que la elección del método debe basarse en las características específicas de cada proyecto, incluyendo la extensión del área, la complejidad del terreno y los recursos disponibles.

En conclusión, la fotogrametría aérea con RPAS representa una alternativa tecnológica avanzada que responde a las demandas actuales de la industria minera, proporcionando levantamientos topográficos rápidos, precisos y seguros. Sin embargo, su implementación debe ir acompañada de la capacitación adecuada y el acceso a herramientas de procesamiento avanzadas para maximizar sus beneficios.

Se recomienda la combinación de ambos métodos en proyectos donde se requieran mediciones específicas de alta precisión, complementadas con modelos topográficos detallados generados por RPAS. Esta estrategia híbrida permite aprovechar las fortalezas de cada técnica, garantizando resultados óptimos en términos de precisión, tiempo y costo. Finalmente, se sugiere que futuras investigaciones exploren la integración de la fotogrametría aérea con tecnologías emergentes, como el escaneo láser terrestre, para continuar optimizando las prácticas topográficas en la industria minera y en otros sectores relacionados.

Contribución de autores: Conceptualización, V.O. y D.Q.; Metodología, V.O., D.Q. y GP; Software, VO.; Validación, V.O., D.Q. y G.P.; análisis formal, V.O., D.Q. y G.P.; Investigación, V.O.; recursos, V.O.; Curaduría de datos, V.O. y D.Q.; redacción-revisión y edición, D.Q y GP.; visualización, G.P.; supervisión, V.O.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Vásquez, D. Evaluación de la exactitud del geoposicionamiento a partir de receptores GNSS y NTRIP en el CADET. Universidad Central del Ecuador. 2020, 1–80.
2. Loots, M.; Clobbelaar, S.; Lingen, E. A review of remote-sensing unmanned aerial vehicles in the mining industry. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 2022, 122, 387–396.
3. Vázquez, R. Tutorial – Planear vuelo fotogramétrico con DroneDeploy y Google Earth (Principiantes). *GeoAsset Blog.* 2018. Available online: <https://geoasset.blog/2018/10/08/tutorial-dronedeploy/> (accessed on 15 June 2022).
4. FOIF. A90 Intelligent GNSS Receiver. 2022.
5. Santamaría, P. DJI Mavic 2 Pro, análisis: un nuevo nivel en calidad de video y foto con dron. Xacata. 2018.
6. Matías, R. Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en Minería Chinalco Perú S.A., Morocha 2020. Universidad Continental, Huancayo, 2020.
7. Calle, M.D.Q. Evaluación de confiabilidad entre estación total, aerofotogrametría con RPAS y GPS diferencial aplicado a proyectos de minería. Universidad Católica de Cuenca, Azogues, 2022.
8. Claros, R.; Guevara, A.; Pacas, N. Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados. Universidad de El Salvador, 2016.
9. Tajadura, R. Uso de Drones en la inspección para la rehabilitación del Patrimonio, Iglesia La Merced. Universidad de Burgos. 2017.
10. Florentino, R. Aplicación de Fotogrametría con RPAS para mejorar la efectividad de cuantificación de la explotación de la Cantera Santa Genoveva. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Perú. 20217.
11. Mamani, H. Levantamiento topográfico tradicional y aerofotogrametría desde vehículos aéreos no tripulados (VANT-DRONES): comparación de coordenadas horizontales y verticales. *Rev. Tecnológica* 2018, 19, 7–19.
12. Sánchez, I. Determinar el grado de confiabilidad del levantamiento topográfico con dron en la Plaza San Luis. Universidad César Vallejo, Perú, 2017; pp. 1–78.
13. Río, O.; Gómez, F.; López, N.; Saenz, J.; Espinoza, A. Análisis comparativo de levantamiento topográfico tradicional y tecnología de drones. *Rev. Arquitect. Ing.* 2020, 4, 13.
14. Roblero, R.; Flores, J.; Jesús, C.; Reyes, A. Evaluación de la confiabilidad de tres métodos topográficos para generar modelos digitales de elevación (MDE). *Ing. Agríc. Biosistemas* 2020, 12, 159–171.
15. Beretta, F.; Shibata, H.; Córdova, R.; Peroni, R.; Azambuja, J.; Leite, F. Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining. *Mining Mineracao* 2018, 71, 463–470.
16. Carrera, J.; Levresse, G.; Lacan, P. Is UAV-SfM surveying ready to replace traditional surveying techniques? *Int. J. Remote Sens.* 2020, 2, 2–30.
17. Trimble Inc. Estación Total Trimble M3. 2016.
18. Ismaga. Autocad CIVL 3D – Soluciones BIM para proyectos de ingeniería civil. 2021. (Acceso: 6 enero 2022).
19. Cortés, E. Levantamientos Topográficos mediante uso de Drones. *Ingeniería, Ciencia Tecnología e Innovación.* 2021. 8,2. 111–124.
20. Guardo, N.; López, L.; y Bilmes, A. Relevamiento topográfico de alta resolución: comparación de modelos del terreno mediante estación total y fotogrametría SfM-MVS. Aplicación en una cantera de suelos seleccionados. Buenos Aires. *Revista de Asociación Geológica Argentina.* 2021. 78,4. 539–549.
21. Jiménez, N.; Magaña, A.; Soriano, E. Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total como método directo y el uso de drones y GPS como métodos indirectos. Universidad de El Salvador, 2019; pp. 1–168.



© 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>