UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/issue/view/1328

DOI: https://doi.org/10.14483/22487638.24995

INVESTIGACIÓN

Análisis en 3D de discontinuidades en afloramientos rocosos mediante fotogrametría y realidad virtual

3D Analysis of Discontinuities in Rock Outcrops Using Photogrammetry and Virtual Reality

Ashly Johana Rodríguez Patiño [1], Ana Gisela Castellanos Acero [2],
Wilder Alberto Ocampo Ochoa [3], Dino Carmelo Manco-Jaraba [4]

Fecha de Recepción: 10 de abril de 2026 **Fecha de Aceptación**: 11 de septiembre de 2026

Cómo citar: A. J. Rodríguez-Patiño, A. G. Castellanos-Acero, W. A. Ocampo Ochoa and D. C. Manco-Jaraba, «Análisis en 3D discontinuidades en afloramientos rocosos mediante fotogrametría y realidad virtual», *Tecnura*, vol. 30, n.° 90, oct. 2026. 4–25. https://doi.org/10.14483/22487638.24995

Resumen

Contexto: A lo largo del tiempo se ha identificado la necesidad de implementar metodologías más precisas y eficaces para la recolección de datos estructurales, así como de generar modelos detallados de los afloramientos a partir de la fotogrametría.
Objetivo: Esta investigación se enfoca en el análisis tridimensional de discontinuidades en afloramientos rocosos mediante el uso de fotogrametría y realidad virtual.
Metodología: Las fotografías tomadas en campo se procesaron en el programa Agisoft Metashape para generar datos espaciales en 3D. A partir de dichos modelos, se llevó a cabo el análisis y la recolección de discontinuidades utilizando los programas CloudCompare y MATLAB, lo que permitió identificar zonas de posibles fallas geológicas. Finalmente, los modelos se integraron en un entorno de realidad virtual mediante el programa Unity.
Resultados: Las familias de discontinuidades con una densidad superior al 3 % resultan de interés debido a su mayor predominancia en el afloramiento rocoso. Asimismo, se identificaron zonas con densidades superiores al 20 %, las cuales permiten analizar su influencia directa en la estabilidad del macizo.
Conclusiones: La modelización tridimensional de macizos rocosos mediante fotogrametría constituye un método eficiente para la recopilación de datos estructurales esenciales en los análisis geomecánicos. Asimismo, representa una herramienta que facilita la verificación y el acceso a información de difícil obtención, optimizando el estudio de estructuras complejas.
Palabras clave: Afloramiento rocoso, densidad, fotogrametría, modelos en 3D, realidad virtual.

1 Ingeniera de minas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia. Correo electrónico: ashly.rodriguez@uptc.co
2 Ingeniera de minas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia. Correo electrónico: ana.castellanos06@uptc.edu.co
3 Ingeniero de minas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia. Correo electrónico: wilder.ocampoptc.edu.co
4 M. Sc. Ingeniero de Minas. Universidad de La Guajira. Riohacha, La Guajira, Colombia. Correo electrónico: dinomancojaraba@gmail.com o dcmancoj@uniguajira.eduu.co

Abstract

Context: Over time, the need to implement more accurate and effective methodologies for structural data collection has been identified, as well as the generation of detailed outcrop models using photogrammetry.
Objective: This research focuses on the 3D analysis of discontinuities in rock outcrops using photogrammetry and virtual reality.
Methodology: Field photographs were processed using Agisoft Metashape to generate 3D spatial data. Based on these models, the analysis and extraction of discontinuities were performed using CloudCompare and MATLAB, enabling the identification of potential geological fault zones. Finally, the models were integrated into a virtual reality environment using Unity.
Results: Discontinuity sets with a density greater than 3 % are of particular interest due to their high prevalence in the rock outcrop. Likewise, zones with densities exceeding 20 % were identified, allowing for the analysis of their influence on rock mass stability.
Conclusions: The 3D modeling of rock masses through photogrammetry is an efficient method for collecting structural data essential for geomechanical analyses. It also serves as a tool that facilitates verification and access to hard-to-obtain information, thereby optimizing the study of complex structures.
Keywords: Rock outcrop, density, photogrammetry, 3D models, virtual reality.

Introducción

La recopilación digital e inteligente de datos geológicos de campo constituye un paso fundamental en la estructuración de la información para la exploración de recursos minerales, desempeñando un rol determinante en la planificación y ejecución de proyectos extractivos y geotécnicos [1]–[5]. Tradicionalmente, la caracterización de campo se ha realizado mediante métodos manuales que, si bien son ampliamente utilizados, presentan limitaciones operativas significativas [6], [7]. Estas técnicas convencionales dependen del acceso físico directo a áreas remotas o inestables, lo que puede comprometer tanto la seguridad del personal especializado como la precisión global de las mediciones [8]–[12]. Asimismo, la prospección manual tiende a ser laboriosa y susceptible al sesgo o error humano, afectando la confiabilidad de las evaluaciones geomecánicas y, por ende, la toma de decisiones en ingeniería civil y minera [6], [7], [13]. Como alternativa a estas restricciones, la integración de vehículos aéreos no tripulados (VANT/drones) facilita la adquisición no destructiva de nubes de puntos tridimensionales de alta resolución. Esto permite la caracterización detallada y remota de familias de discontinuidades en macizos rocosos, especialmente en frentes de excavación o zonas de alto riesgo.

En este panorama, la fotogrametría digital se ha consolidado como una herramienta metodológica clave para superar tales inconvenientes. Esta técnica permite la reconstrucción de modelos digitales 3D de afloramientos geológicos, optimizando el análisis espacial de estructuras como diaclasas, fallas y planos de estratificación sin requerir contacto físico directo con la pared rocosa [9], [14]–[16]. Al respecto, diversos autores señalan que la fotogrametría digital —en combinación con el escaneo láser terrestre (TLS)— simplifica la extracción de parámetros geomecánicos esenciales como la orientación, el espaciado, la persistencia y la rugosidad de las juntas [17].

A la par de estos avances en captura digital, la realidad virtual (RV) se posiciona como una tecnología complementaria de alto impacto, al ofrecer entornos inmersivos e interactivos para la visualización de afloramientos virtuales y la realización de mediciones estructurales sin exposición a peligros físicos. Las metodologías basadas en fotogrametría mediante drones e integración en RV resultan sensiblemente más eficientes y seguras frente a la topografía tradicional, sobre todo en macizos con geometrías complejas o pendientes escarpadas [18]–[20].

Por consiguiente, la aplicación convergente del modelado 3D y las herramientas inmersivas no solo incrementa la precisión en la caracterización de discontinuidades, sino que también reduce sustancialmente los tiempos de gabinete y mitiga los riesgos laborales [14]–[16], [21]. Adicionalmente, la realidad virtual impulsa modelos de aprendizaje activo e investigación colaborativa mediante simulaciones y visitas de campo virtuales interactivas que superan las capacidades del material pedagógico bidimensional. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar en 3D las discontinuidades en afloramientos rocosos mediante el uso integrado de fotogrametría digital y realidad virtual.

2. Localización

El área de estudio se encuentra en el sector "Pirámides", municipio de Sogamoso, departamento de Boyacá (Colombia); limita al norte con el municipio de Nobsa, al sur con el departamento del Casanare y al oeste con el departamento de Arauca (Figura 1).

3. Metodología

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva en diversas bases de datos académicas y científicas, tales como Scopus, ScienceDirect (Elsevier), SciELO, Springer Nature, Web of Science (Clarivate), Google Scholar y ResearchGate. En esta etapa se emplearon cadenas de búsqueda con palabras clave y operadores booleanos relacionados con el tema de estudio —tales como análisis 3D, discontinuidades, afloramientos rocosos, fotogrametría y realidad virtual—, con el objetivo de identificar antecedentes metodológicos y aplicaciones recientes de estas tecnologías en la caracterización geológica y geotécnica.

Posteriormente, se llevaron a cabo salidas de campo orientadas a la adquisición de información geoespacial y registro fotográfico del afloramiento rocoso. Durante estas actividades se realizaron labores de reconocimiento del área de estudio, identificación estructural y acopio de datos de control. Para la captura de imágenes se empleó un vehículo aéreo no tripulado (VANT/dron) para la obtención de tomas cenitales y oblicuas de alta resolución, complementado con una cámara fotográfica digital Nikon D7500 para la toma de detalles a escala de afloramiento.

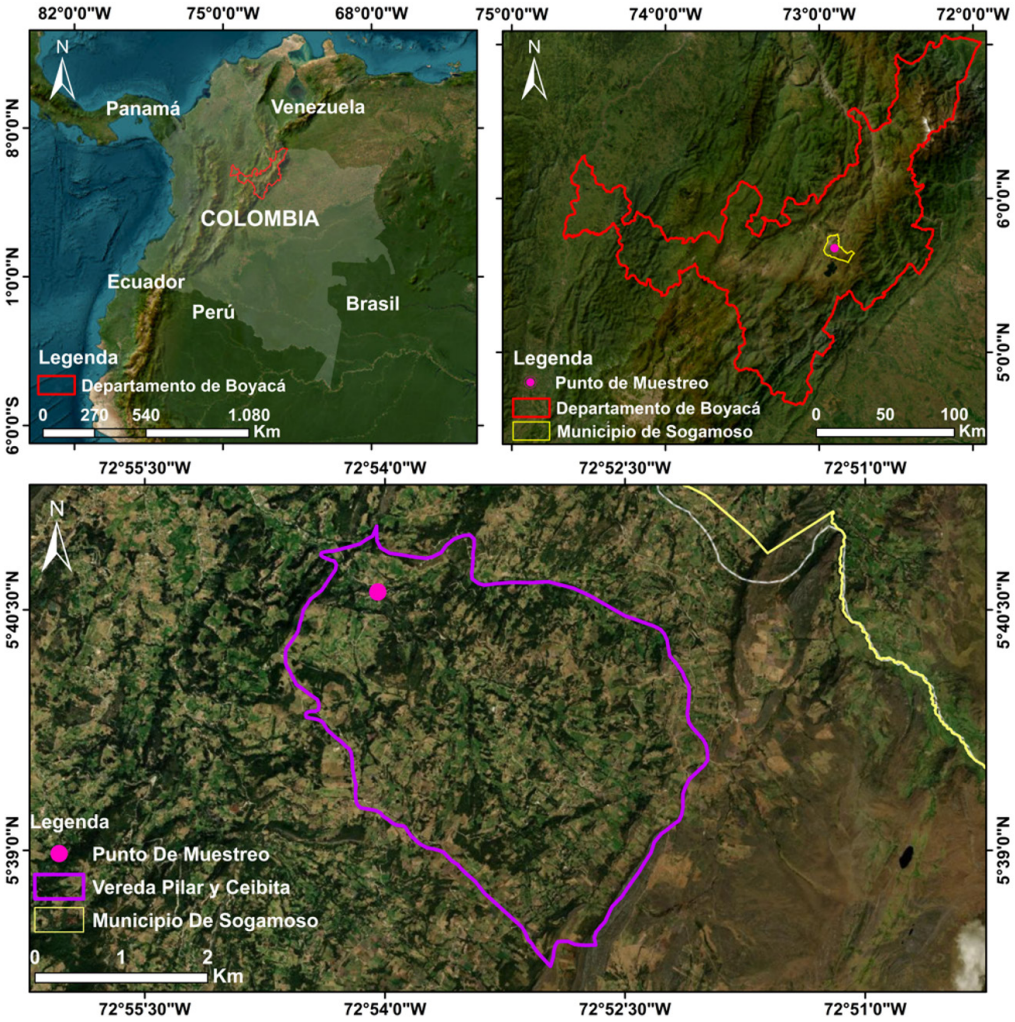


Figura 1. *Mapa de localización.*

Fuente: elaboración propia

El proceso de adquisición de imágenes se ejecutó bajo un protocolo fotogramétrico riguroso para garantizar una adecuada superposición y cobertura del macizo rocoso. En primer lugar, se dispusieron cuatro puntos de control terrestre (GCPs) georreferenciados en campo, los cuales se utilizaron posteriormente para la correcta escala métrica y georreferenciación absoluta del modelo tridimensional. A continuación, se efectuaron los sobrevuelos con el dron asegurando una superposición longitudinal y lateral aproximada del 70 % al 80 % entre fotogramas consecutivos.

Adicionalmente, se efectuaron tomas terrestres desde diferentes posiciones alrededor del afloramiento, capturando entre 60 y 120 fotografías en función de la extensión del macizo rocoso. Las imágenes se tomaron desde diversos ángulos de captura para optimizar la reconstrucción tridimensional:

- **Tomas perpendiculares al afloramiento (0°):** orientadas a registrar la geometría general y la morfología de la superficie rocosa.
- **Tomas inclinadas (aprox. +20°):** con un ángulo ascendente para capturar sectores superiores y mejorar la definición de los planos estructurales.
- **Tomas inclinadas (aprox. -20°):** con un ángulo descendente para registrar las zonas inferiores y reconstruir adecuadamente la persistencia y rugosidad de las discontinuidades.

Este procedimiento permitió obtener un conjunto de imágenes aéreas y terrestres de alta resolución con cobertura integral del macizo rocoso, garantizando condiciones de superposición óptimas, múltiples perspectivas de observación y un estricto control geoespacial mediante puntos de control terrestre (GCPs), elementos fundamentales para la posterior generación de modelos 3D precisos mediante fotogrametría digital.

Las imágenes se procesaron en el programa Agisoft Metashape (versión 2.2.1) aplicando el algoritmo *Structure from Motion* (SfM) para la reconstrucción de la nube densa de puntos y la generación de ortomosaicos georreferenciados. A partir de la nube densa se elaboraron mallas polinómicas 3D evaluadas bajo distintas representaciones visuales: el modo de malla (*wireframe*), que permite analizar la densidad de la triangulación y detectar artefactos en la reconstrucción geométrica, y el modo de confianza (*confidence*), que evalúa la precisión geométrica del modelo 3D mediante un mapa cromático. En este último, los tonos verdes y azules representan zonas de alta confianza (error menor a 3 cm) asociadas a áreas con óptima superposición fotográfica y control georreferenciado en escala métrica.

Para la caracterización de las discontinuidades se emplearon las herramientas CloudCompare y el paquete DSE en MATLAB, lo que permitió la extracción automatizada y semiautomatizada de parámetros estructurales (dirección de buzamiento, buzamiento y espaciamiento), así como la clasificación de las familias de discontinuidades. Los resultados se representaron mediante diagramas estereográficos de polos y mapas de densidad.

Finalmente, los modelos 3D se adaptaron e integraron en un entorno inmersivo denominado *Mirador Geológico VR*, desarrollado para la exploración, medición y manipulación interactiva de los datos en realidad virtual, facilitando la interpretación geomecánica remota del macizo.

4. Resultados

Interpretación del macizo rocoso con 10 familias de discontinuidades

El análisis de los datos estructurales evidencia la presencia de diez familias de discontinuidades diferenciadas a partir de la dirección de buzamiento (*dip direction*) y el ángulo de buzamiento (*dip*), las cuales presentan distintas frecuencias relativas dentro del macizo rocoso. La familia dominante corresponde a

la orientación 170,35°/44,74°, la cual concentra aproximadamente el 22,26 % de las mediciones, indicando un sistema de fracturamiento principal con buzamiento moderado hacia el sureste. Esta orientación sugiere un control estructural significativo asociado posiblemente a esfuerzos tectónicos regionales que generaron planos de debilidad preferenciales en dicha dirección. En segundo orden de importancia se ubica la familia 78,10°/88,55° con un 11,30 %, caracterizada por un buzamiento prácticamente vertical, lo que indica la presencia de fracturas tensionales o estructuras de cizalla subverticales con marcada influencia en la estabilidad del macizo. Asimismo, se identifica otra familia relevante en 188,78°/11,99° (14,02 %), cuyo bajo ángulo de buzamiento evidencia planos subhorizontales que podrían estar asociados a superficies de estratificación o planos de deslizamiento potencial, especialmente en ambientes sedimentarios o en macizos sometidos a relajación tectónica (Tabla 1).

Por otra parte, el resto de las familias estructurales presenta frecuencias menores, pero igualmente determinantes para la caracterización geomecánica del macizo. Orientaciones como 221,09°/39,93° (11,44 %) y 241,31°/66,03° (8,13 %) sugieren sistemas conjugados de fracturamiento con buzamientos moderados a altos, lo que refleja episodios de deformación asociados a esfuerzos compresivos o transcurrentes. De igual manera, las familias 324,73°/20,97°, 121,99°/32.93° y 271,11°/39,20° —con frecuencias comprendidas entre el 6 % y el 7,5 %— indican la presencia de discontinuidades secundarias que incrementan la anisotropía del macizo. Las orientaciones menos frecuentes, tales como 341,35°/49,65° (3,09 %) y 53,17°/27,77° (4,32 %), aunque estadísticamente menores, representan un papel crítico en la formación de cuñas o bloques inestables al interactuar con los sistemas principales de fracturamiento. En conjunto, la distribución espacial de estas diez familias estructurales evidencia un patrón complejo de fracturamiento multiorientado. Este comportamiento constituye un factor clave en la evaluación cinemática de taludes y excavaciones subterráneas, ya que la intersección entre dichos planos controla los mecanismos de falla potenciales en el macizo (Tabla 1).

Tabla 1. *Datos de 10 Familias de discontinuidades*

	Dip Direction	Dip	%
1	170.3548	44.7388	22.26
2	78.1053	88.5466	11.30
3	188.7780	11.9978	14.02
4	324.7295	20.9743	7.43
5	221.0859	39.9339	11.44
6	121.9970	32.9309	7.48
7	241.3068	66.0250	8.13
8	271.1097	39.1991	6.32
9	341.3534	49.6536	3.09
10	53.1728	27.7747	4.32

Fuente: Autores

El estereograma de densidad de polos evidencia una distribución anisotrópica de las discontinuidades, caracterizada por la presencia de diez conjuntos estructurales ($J_1 - J_{10}$) claramente diferenciados mediante máximos de densidad en la proyección hemisférica inferior. El máximo principal se observa en el conjunto J_1, el cual presenta la mayor concentración de polos, indicando una alta persistencia y repetitividad estructural dentro del macizo rocoso. Desde el punto de vista geomecánico, esta concentración sugiere la existencia de un sistema de fracturamiento dominante asociado, probablemente, a un evento tectónico regional que generó planos de debilidad con buzamientos moderados. La geometría elipsoidal de las isolíneas alrededor de este máximo sugiere una dispersión angular relativamente baja, lo que implica una orientación estructural bien definida y una reducida variabilidad en el campo de esfuerzos que originó estas discontinuidades. De manera similar, los agrupamientos J_5 y J_7, ubicados hacia el sector oriental del estereograma, representan sistemas estructurales secundarios con densidades significativas, posiblemente relacionados con fracturas conjugadas generadas bajo un régimen de esfuerzos compresivo o transcurrente, donde la orientación de los planos refleja la redistribución de los esfuerzos principales (σ_1, σ_2 y σ_3) durante la deformación del macizo.

Adicionalmente, el diagrama muestra concentraciones menores, pero estructuralmente relevantes correspondientes a los conjuntos J_2, J_3, J_4, J_6, J_8, J_9 y J_{10}, los cuales evidencian una mayor dispersión de polos y, por ende, una variabilidad angular superior. Esta característica es común en sistemas de fracturamiento generados por procesos de relajación tectónica, meteorización diferencial o reajustes locales en el macizo rocoso. El conjunto J_2, ubicado en el sector occidental del estereograma, presenta polos concentrados cerca del borde del círculo primitivo, lo que indica planos con buzamientos altos a subverticales, típicos de fracturas tensionales o diaclasas verticales que suelen controlar la permeabilidad estructural del macizo. Por otra parte, los conjuntos J_3, J_4 y J_{10} se localizan en zonas intermedias de la proyección, sugiriendo buzamientos moderados compatibles con planos de estratificación, foliación o discontinuidades generadas durante episodios de deformación secundaria. Finalmente, los conjuntos J_8 y J_9, ubicados hacia el hemisferio sur, representan discontinuidades cuyas orientaciones pueden interactuar geométricamente con los sistemas dominantes para formar intersecciones capaces de generar cuñas potencialmente inestables. En términos de ingeniería de rocas, la coexistencia de estos múltiples conjuntos evidencia un macizo altamente fracturado con marcada anisotropía estructural. Esta condición influye directamente en la resistencia al corte, la deformabilidad y la estabilidad de excavaciones o taludes, ya que la intersección entre los planos de discontinuidad puede controlar mecanismos de falla tales como deslizamiento planar, falla por cuña o vuelco (*toppling*), dependiendo de la orientación del frente de excavación respecto al sistema estructural predominante.

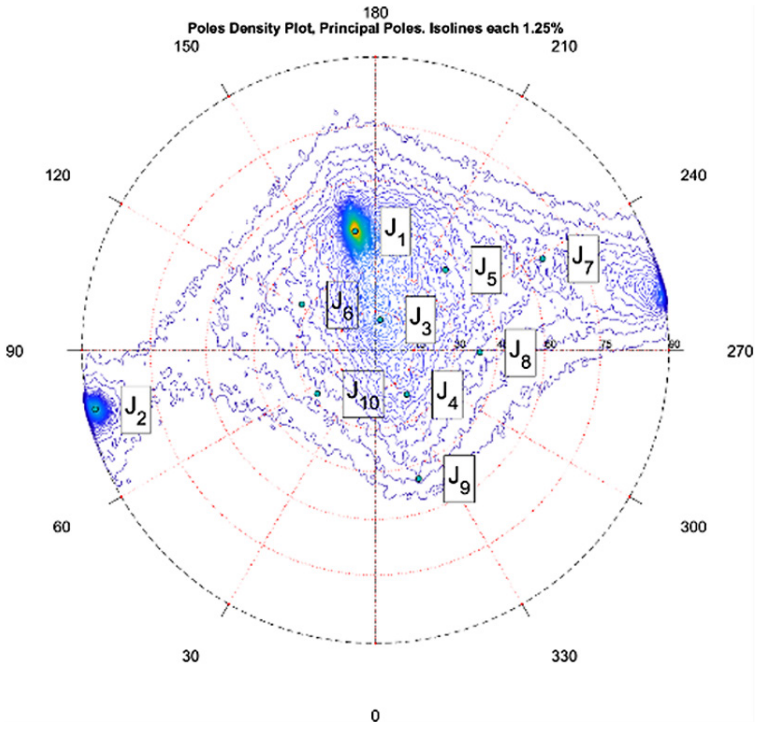


Figura 2. *Red Estereográfica*

Fuente: Autores

La proyección estereográfica (Figura 3) evidencia una segmentación estructural del macizo rocoso en múltiples dominios cinemáticamente coherentes, donde cada agrupación cromática representa agrupamientos (*clusters*) de polos asociados a familias de discontinuidades con baja dispersión angular. La distribución de estos polos muestra concentraciones significativas cercanas al círculo primitivo, particularmente en los cuadrantes E–W, lo que indica la presencia de planos de discontinuidad con buzamientos altos a subverticales, típicos de sistemas de diaclasas tensionales o fracturas de cizalla generadas bajo regímenes tectónicos frágiles donde los esfuerzos σ_1 y σ_2 se disponen aproximadamente horizontales. En contraste, los agrupamientos localizados hacia posiciones intermedias y centrales del estereograma corresponden a discontinuidades con buzamientos moderados a bajos, lo que sugiere la coexistencia de planos estructurales asociados a estratificación, foliación o fracturas de relajación, reflejando una superposición de eventos deformacionales que condicionaron la arquitectura estructural del macizo. La delimitación clara entre dominios indica que los conjuntos presentan alta persistencia y coherencia geométrica, lo cual implica una anisotropía estructural marcada que controla el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Desde el punto de vista geomecánico, la interacción espacial entre estas familias favorece la generación de intersecciones estructurales capaces de formar cuñas potencialmente inestables, especialmente cuando los planos presentan buzamientos compatibles con la orientación de taludes o excavaciones, sugiriendo que los mecanismos de falla dominantes están gobernados por deslizamiento planar y falla por cuña.

La geometría lobular de las isolíneas de densidad (Figura 4) refleja la presencia de múltiples concentraciones de polos asociadas a familias de discontinuidades con coherencia geométrica, lo que indica que el macizo experimentó varios episodios de fracturamiento bajo diferentes condiciones del campo de esfuerzos. Las concentraciones que se extienden hacia el círculo primitivo en los sectores E–W (aprox. 90° y 260°–270°) corresponden a polos de planos con buzamientos elevados a subverticales, consistente con sistemas de diaclasas tensionales o fracturas de cizalla frágil desarrolladas bajo esfuerzos principales máximo (σ_1) e intermedio (σ_2) dispuestos horizontalmente. La elongación de estas zonas de alta densidad sugiere una dispersión angular moderada, interpretada como variaciones locales en la orientación del campo de esfuerzos o reactivaciones estructurales posteriores. Por otra parte, los lóbulos localizados hacia el hemisferio inferior y sectores centrales indican la presencia de discontinuidades con buzamientos moderados a bajos, correspondientes a planos de estratificación, foliación o superficies de debilidad heredadas del proceso de formación litológica. Desde una perspectiva geomecánica, esta configuración evidencia un macizo estructuralmente anisotrópico y compartimentado, donde la interacción espacial entre las discontinuidades genera una red tridimensional de bloques. La superposición de dominios con distintos rangos de buzamiento implica que la resistencia al corte estará controlada por la orientación relativa entre estos planos y el frente de excavación, favoreciendo mecanismos de inestabilidad como deslizamiento planar en planos de bajo a moderado buzamiento, fallas por cuña en la intersección de planos de alto buzamiento y procesos de vuelco (*toppling*) en sistemas subverticales, especialmente cuando la persistencia y el espaciamiento facilitan la liberación cinemática de los bloques.

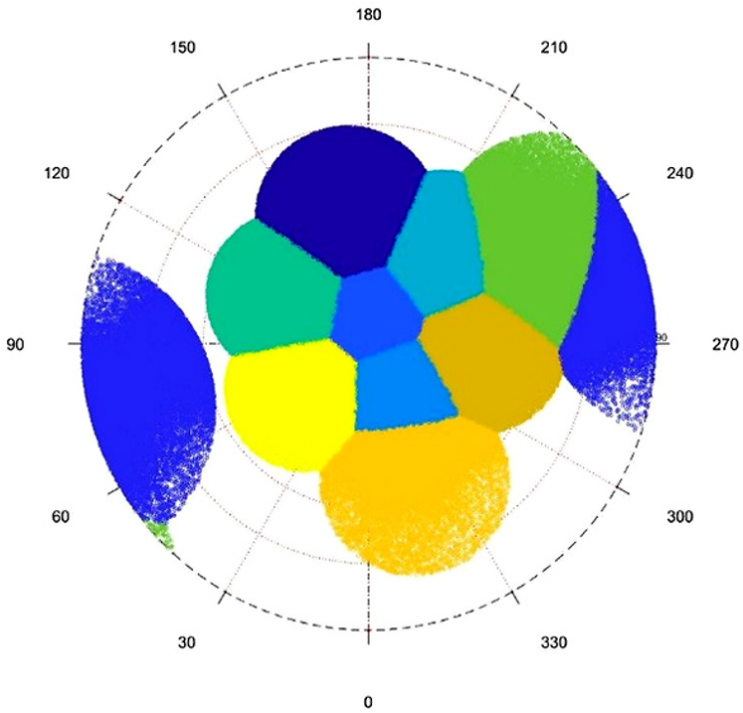


Figura 3. *Proyección estereográfica.*

Fuente: Autores.

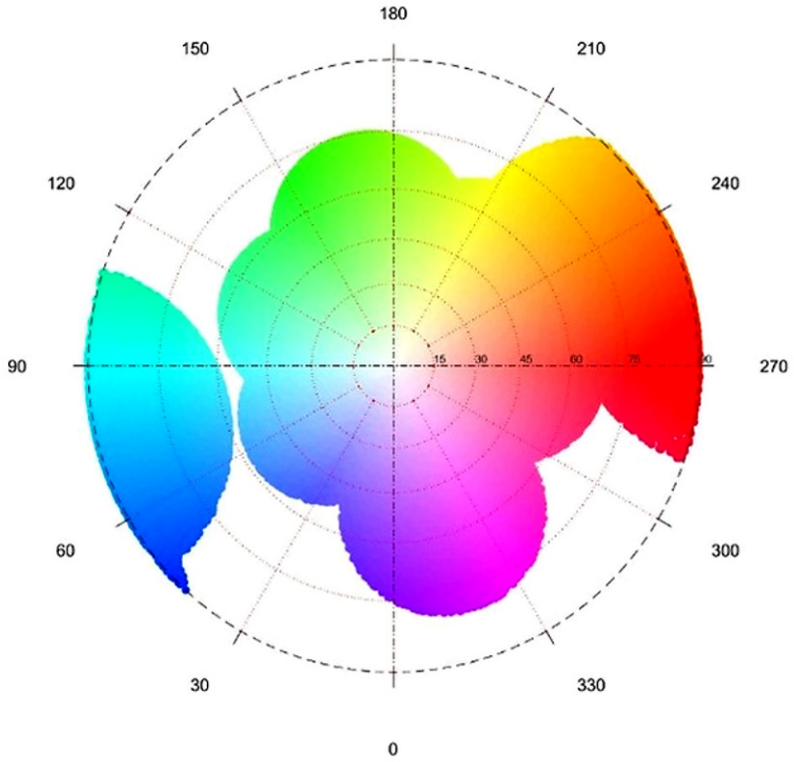


Figura 4. *Proyección estereográfica.*

Fuente: Autores.

A partir de la interpretación geométrica de la nube de puntos tridimensional mostrada en la Figura 5, es posible realizar una cuantificación técnica preliminar de los parámetros estructurales y geomecánicos de la discontinuidad representada. En primer lugar, considerando la escala indicada en los ejes del modelo, la superficie reconstruida presenta una longitud de 55 m a 65 m, mientras que su ancho efectivo oscila entre 8 m y 12 m, lo que indica una relación longitud/ancho cercana a 5–6, característica típica de discontinuidades estructurales persistentes desarrolladas bajo regímenes de fracturamiento frágil. La continuidad geométrica de la superficie sugiere una persistencia superior a 50 m (> 50 m), lo cual, según las clasificaciones geomecánicas empleadas en ingeniería de rocas, corresponde a discontinuidades de persistencia muy alta, capaces de condicionar el comportamiento mecánico global del macizo rocoso. Asimismo, la ligera curvatura longitudinal observada permite estimar una ondulación macroscópica del orden de 0,5 m a 1,5 m, lo que indica que el plano no es completamente planar, sino que presenta variaciones geométricas capaces de generar cambios locales en la orientación del esfuerzo cortante durante un eventual proceso de deslizamiento.

En términos de rugosidad estructural, la textura irregular observada en la nube de puntos sugiere la presencia de microasperidades distribuidas a lo largo de la superficie, lo que permite inferir un

coeficiente de rugosidad de juntas (*Joint Roughness Coefficient*, JRC) estimado entre 8 y 12, correspondiente a superficies moderadamente rugosas según la clasificación clásica de Barton. Este rango de rugosidad implica que la resistencia al corte estará parcialmente gobernada por el interbloqueo mecánico entre asperezas, especialmente bajo regímenes de esfuerzos normales moderados. Desde la perspectiva de la resistencia al corte, si se considera un rango típico de ángulo de fricción básico (ϕ_b) comprendido entre 28° y 35° para litologías sedimentarias o volcanosedimentarias moderadamente meteorizadas, la combinación de este parámetro con el valor estimado de JRC sugiere que la resistencia al corte pico de la discontinuidad podría situarse entre 35° y 45°, en función del nivel de confinamiento normal efectivo. Por otra parte, la continuidad espacial y la orientación subparalela del plano indican que esta discontinuidad podría actuar como superficie potencial de deslizamiento planar, en particular si su buzamiento resulta cinemáticamente favorable respecto a la orientación de taludes o excavaciones. En este contexto, considerando su alta persistencia (> 50 m), rugosidad moderada (JRC 8–12) y continuidad estructural, esta discontinuidad podría controlar volúmenes potenciales de falla del orden de 10^3 m^3 a 10^4 m^3, dependiendo del espaciamiento y de la interacción con otros sistemas de fracturamiento presentes en el macizo, lo que resalta la relevancia de integrar modelos tridimensionales en los análisis geomecánicos y numéricos de estabilidad.

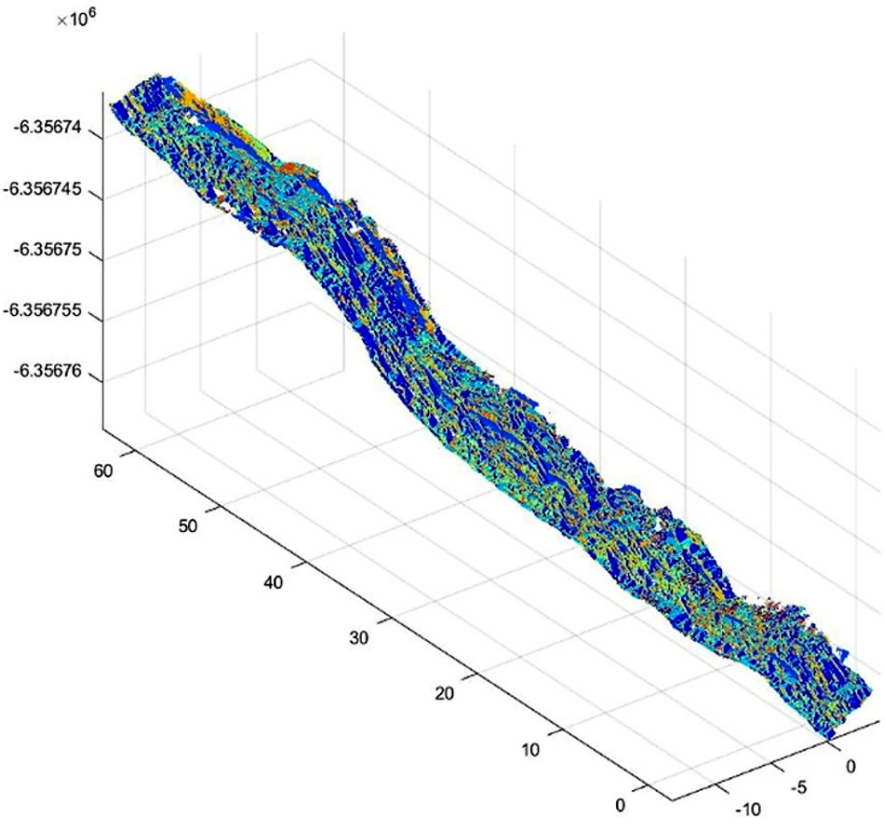


Figura 5. *Modelo tridimensional.*

Fuente: Autores

A partir de la escala del modelo, se estimó que la superficie presenta una longitud de 60 m a 65 m y un ancho efectivo de 8 m a 12 m, lo que implica una superficie estructural cercana a 500 m^2 a 700 m^2. Esta relación geométrica evidencia una discontinuidad altamente persistente, característica de planos estructurales mayores tales como fracturas regionales, planos de estratificación dominantes o superficies de cizalla. La ligera curvatura longitudinal observada sugiere una variación altimétrica de 1,5 m a 2,5 m a lo largo de la superficie, lo que corresponde a una ondulación macroscópica del 2 % al 4 % respecto a la longitud total. Esta ondulación es típica de discontinuidades desarrolladas bajo condiciones de deformación frágil, donde el desplazamiento relativo entre bloques genera superficies irregulares con crestas y depresiones longitudinales (Figura 6).

Desde el punto de vista geomecánico, el patrón cromático revela una alta heterogeneidad en la rugosidad superficial, evidenciada por la presencia de bandas lineales y microrrelieves distribuidos a lo largo de la discontinuidad. A partir de la densidad de irregularidades observadas y su escala espacial (centimétrica a decimétrica), se estima un coeficiente de rugosidad de juntas (*Joint Roughness Coefficient*, JRC) en el rango de 10 a 14, correspondiente a superficies moderadamente rugosas a rugosas según la clasificación clásica de Barton. Este nivel de rugosidad implica una contribución significativa del interbloqueo mecánico de asperezas a la resistencia al corte. Si se considera un ángulo de fricción básico de la roca (ϕ_b) comprendido entre 28° y 35° (valores característicos para litologías sedimentarias o volcanosedimentarias), la resistencia al corte pico de la discontinuidad —estimada mediante el criterio de Barton-Bandis— podría situarse entre 38° y 48° bajo regímenes de esfuerzos normales moderados. Asimismo, la continuidad espacial de la superficie confirma una persistencia superior a 60 m (> 60 m), lo cual, según clasificaciones geomecánicas en ingeniería de rocas, la define como una discontinuidad de persistencia muy alta, capaz de condicionar el comportamiento estructural del macizo rocoso. Considerando esta persistencia y un espaciamiento potencial de 10 m a 20 m (típico en macizos fracturados), el volumen de bloques potencialmente controlados por esta estructura se sitúa en un rango aproximado de 10^3 m^3 a 10^4 m^3, lo cual tiene implicaciones directas en la evaluación cinemática de taludes y excavaciones. En consecuencia, la caracterización tridimensional representada proporciona una base cuantitativa para la evaluación geomecánica avanzada del macizo rocoso, permitiendo integrar parámetros como persistencia, rugosidad y ondulación en modelos numéricos de estabilidad y en análisis cinemáticos de falla planar o por cuña (Figura 6).

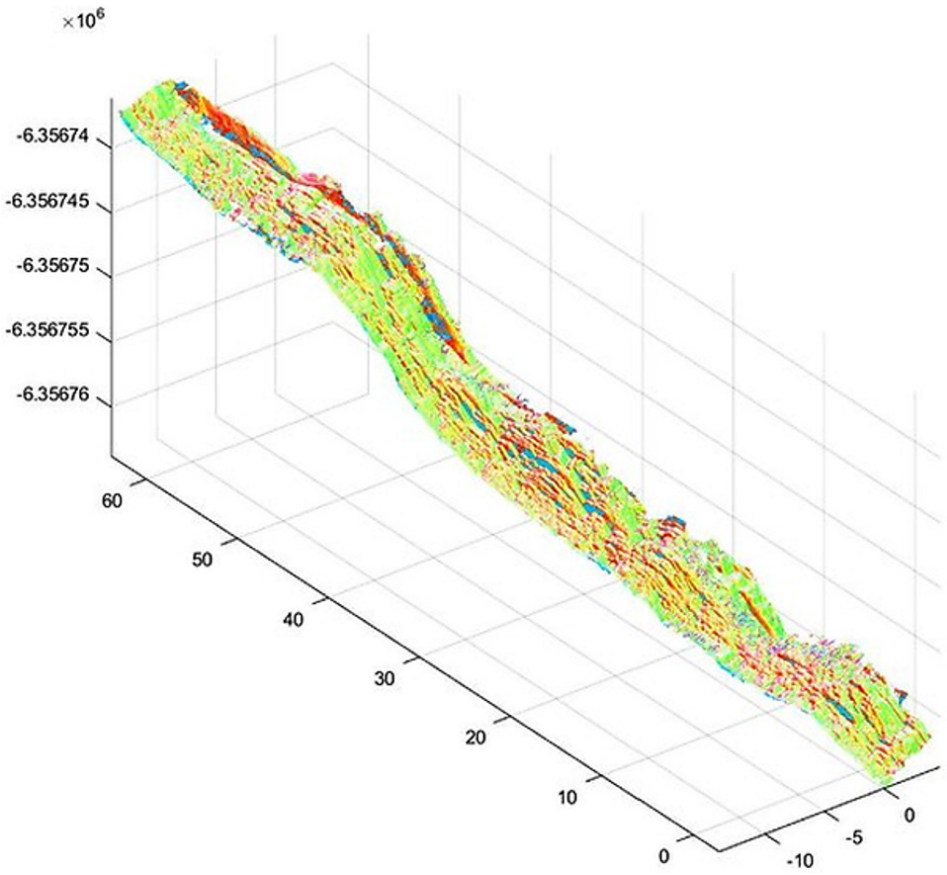


Figura 6. *Modelo Tridimensional.*

Fuente: Autores.

Toma de discontinuidades en *CloudCompare*

La discontinuidad presenta una longitud de 62 m a 65 m, con un ancho efectivo comprendido entre 9 m y 11 m, lo que implica un área superficial de 560 m^2 a 715 m^2. La superficie muestra una variación altimétrica longitudinal estimada de 2,0 m a 2,6 m, correspondiente a una ondulación macroscópica relativa del 3,2 % al 4,1 % con respecto a la longitud total, lo que confirma una geometría ligeramente ondulada. La distribución cromática indica que aproximadamente del 45 % al 50 % de la superficie corresponde a zonas de baja variabilidad topográfica (tonos azules), mientras que del 35 % al 40 % presenta una rugosidad intermedia (tonos verdes y amarillos) y del 10 % al 15 % se asocia a sectores de alta irregularidad geométrica (tonos rojos), concentrados principalmente en los segmentos central y distal del plano. Esta configuración evidencia una heterogeneidad espacial significativa en la morfología de la superficie, asociada a zonas de cizallamiento localizado, microfracturación secundaria o variaciones en la resistencia litológica durante el proceso de ruptura (Figura 7).

Desde la perspectiva geomecánica, la densidad y amplitud de las irregularidades observadas permiten estimar una rugosidad superficial con amplitudes microtopográficas de 3 cm a 12 cm, mientras que las ondulaciones mesoscópicas alcanzan longitudes de onda de 1,5 m a 4 m. Con base en estas características geométricas y bajo los criterios de clasificación del coeficiente de rugosidad de juntas (*Joint Roughness Coefficient*, JRC) de Barton y Choubey, la discontinuidad se clasifica dentro de un rango de JRC de 12 a 16, correspondiente a superficies moderadamente rugosas a rugosas. Si se considera un ángulo de fricción básico de la roca (ϕ_b) entre 30° y 35° —valores característicos para areniscas o rocas sedimentarias moderadamente meteorizadas—, la resistencia al corte máxima estimada mediante el criterio empírico de Barton-Bandis se sitúa entre 42° y 52° bajo esfuerzos normales moderados (σ_n de 0,5 MPa a 2 MPa). Asimismo, la persistencia estructural superior a 60 m (> 60 m) y la continuidad geométrica observada indican que esta estructura puede controlar bloques con un volumen comprendido entre 2 x 10^3 m^3 y 1 x 10^4 m^3, en función del espaciamiento con otros sistemas de discontinuidades. En términos de estabilidad, la presencia de sectores de menor rugosidad relativa (zonas azules que representan el 50 % del área) actuaría como planos de deslizamiento preferenciales, especialmente ante condiciones hidrogeológicas desfavorables o reducciones de la resistencia efectiva por presión de poros. En consecuencia, la cuantificación geométrica derivada del modelo digital proporciona parámetros para el modelado geomecánico avanzado del macizo rocoso, permitiendo incorporar valores de persistencia, rugosidad y ondulación en análisis cinemáticos y numéricos de estabilidad de taludes o excavaciones (Figura 7).

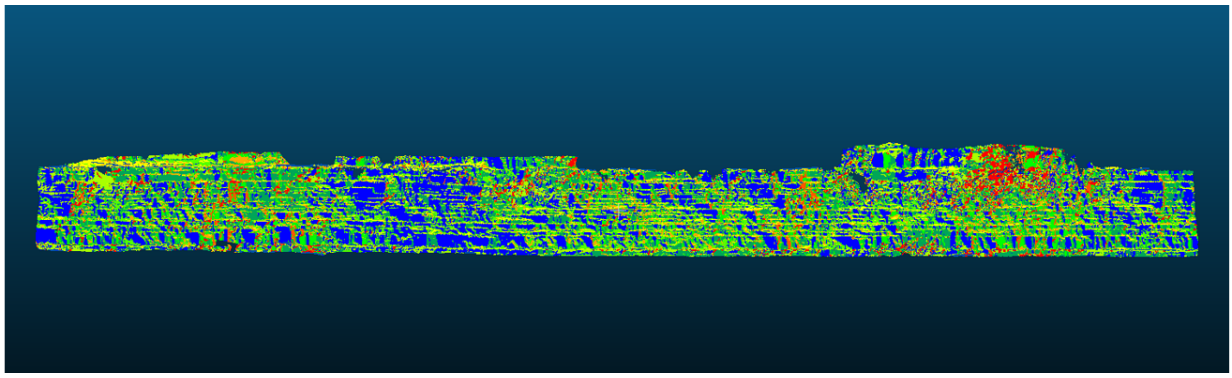


Figura 7. F*amilias de discontinuidades en el macizo rocoso.*

Fuente: Autores.

Validación de datos en modelo 3D

La comparación entre las mediciones estructurales obtenidas directamente en campo y las derivadas del modelo tridimensional (3D) permite evaluar la fiabilidad geométrica del proceso de reconstrucción digital. Para el ángulo de buzamiento (*dip*), el valor medio medido en terreno fue de 38,98°, mientras que el modelo 3D registró una media de 42,18°, lo que representa una diferencia relativa del 8 %. Esta variación se encuentra dentro de los rangos de tolerancia reportados en estudios de caracterización estructural mediante fotogrametría digital y escaneo LiDAR terrestre, en los cuales las desviaciones

comprendidas entre el 5 % y el 10 % se consideran aceptables en función de la resolución de la nube de puntos, el algoritmo de interpolación empleado y la presencia de irregularidades en la superficie analizada. La ligera sobreestimación del buzamiento en el modelo digital se atribuye a la influencia de microondulaciones y asperezas superficiales, las cuales afectan el cálculo del plano medio durante los procesos de ajuste geométrico aplicados a la nube de puntos.

En cuanto a la dirección de buzamiento (*dip direction*), el valor medio medido en campo fue de 193,97°, frente a los 201,20° registrados por el modelo 3D, lo que corresponde a una diferencia relativa del 4 % (aproximadamente 7,2°). Esta discrepancia angular es reducida y confirma una alta consistencia geométrica entre ambas metodologías, dado que en geología estructural aplicada las diferencias inferiores a 10° se consideran representativas de un mismo plano estructural, en especial al analizar superficies naturales con variaciones morfológicas. En conjunto, los resultados indican que el modelo tridimensional reproduce adecuadamente la orientación espacial de la discontinuidad, con desviaciones inferiores al 10 %, lo cual valida la solidez del procedimiento de reconstrucción digital y respalda su aplicación en análisis estructurales detallados, modelado geomecánico y evaluaciones cinemáticas de estabilidad en macizos rocosos.

Tabla 2. *Validación de datos estructurales. Campo vs Modelo 3D.*

Parámetro	Campo (Prom.)	Modelo 3D (Prom.)	Diferencia (%)
Dip	38,98	42,18	8%
Dip Direction	193,97	201,20	4%

Fuente: Autores

El estereograma de densidad de polos de discontinuidades revela la presencia de diez familias estructurales principales ($J_1 - J_{10}$). Estas se identificaron a partir de concentraciones de densidad delimitadas por isolíneas con intervalos del 1,25 %, lo cual permite cuantificar la frecuencia relativa de cada conjunto dentro del macizo rocoso. La familia J_1 representa el sistema dominante al concentrar el 22,26 % del total de las mediciones, lo que evidencia una alta persistencia y repetitividad geométrica de este plano en el macizo. Su orientación promedio —cercana a 170°–175° de dirección de buzamiento y 40°–45° de buzamiento— sugiere la presencia de un plano estructural regional con inclinación moderada hacia el S–SE, asociado a superficies de estratificación o fracturas tectónicas mayores. El segundo grupo en orden de representatividad corresponde a la familia J_3 (14,02 %), caracterizada por buzamientos bajos de 10° a 15°, indicando discontinuidades subhorizontales con potencial para actuar como superficies de deslizamiento planar bajo condiciones geomecánicas desfavorables. Otras familias relevantes incluyen a J_5 (11,44 %) y J_2 (11,30 %), cuyos polos se concentran cerca del borde del círculo primitivo, señalando

planos con buzamientos altos a subverticales (80° a 90°), típicos de sistemas de diaclasas tensionales o fracturas de cizalla desarrolladas bajo un régimen tectónico frágil (Figura 8).

Las familias restantes presentan frecuencias intermedias a bajas, pero contribuyen significativamente a la anisotropía estructural del macizo rocoso. En concreto, las familias J_7 (8,13 %), J_6 (7,48 %) y J_4 (7,43 %) muestran buzamientos moderados a altos de 30° a 65°, indicando sistemas conjugados de fracturamiento asociados a fases de deformación compresiva o transpresiva. Por su parte, las familias J_8 (6,32 %), J_{10} (4,32 %) y J_9 (3,09 %) representan discontinuidades menos frecuentes cuya orientación espacial resulta crítica en términos de estabilidad estructural, dado que la intersección geométrica entre estos planos y los grupos dominantes genera bloques delimitados por cuñas potencialmente inestables. En términos globales, las cuatro familias principales (J_1, J_3, J_2 y J_5) concentran aproximadamente el 59 % del total de las discontinuidades medidas, lo que demuestra que el comportamiento geomecánico del macizo está controlado por un número limitado de familias estructurales. Desde una perspectiva geomecánica, esta distribución evidencia un macizo anisotrópico en el cual la coexistencia de discontinuidades subhorizontales, moderadamente inclinadas y subverticales favorece diversos mecanismos de inestabilidad —incluidos el deslizamiento planar en planos de bajo buzamiento, fallas por cuña en la intersección de planos de alto buzamiento y procesos de vuelco (*toppling*) asociados a fracturas subverticales—, aspectos determinantes en los análisis cinemáticos y en el diseño de taludes o excavaciones (Figura 8).

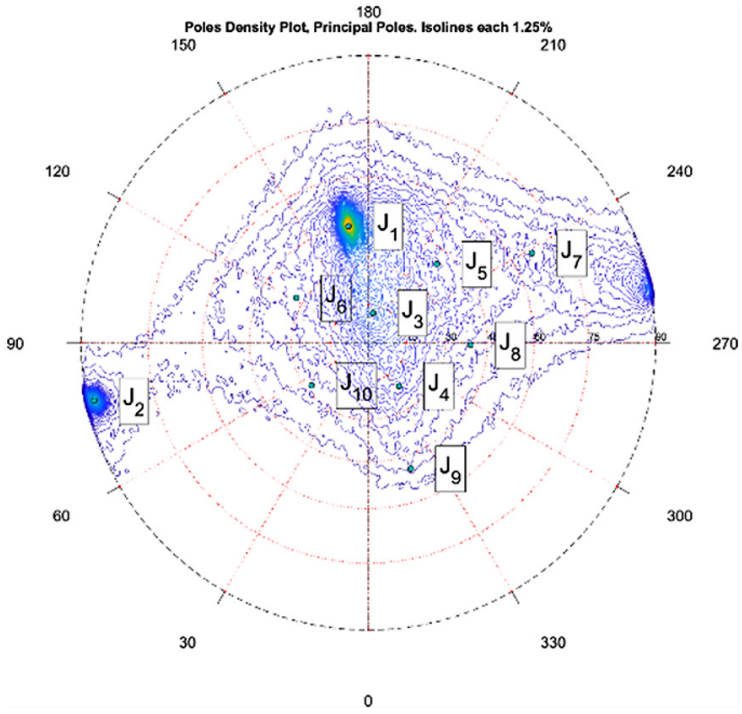


Figura 8. *Validación de datos en modelo 3D.*

Fuente: Autores.

La Figura 9 representa el estereograma de polos de discontinuidades (hemisferio inferior, proyección de igual ángulo) generado a partir de 139 mediciones estructurales de campo y gabinete. Su distribución espacial expone una nítida anisotropía estructural en el macizo rocoso, permitiendo la diferenciación de tres familias principales de discontinuidades mediante análisis de densidad e interpolación estadística. El mapa de isolíneas revela una densidad máxima de concentración de polos del 12,43 %, denotando un alto grado de agrupamiento y, en consecuencia, una orientación preferencial bien definida para los planos de discontinuidad. El primer conjunto estructural (1_m) exhibe un buzamiento promedio de 45° y una dirección de buzamiento de 169°, lo que corresponde a planos con inclinación moderada hacia el SSE. Este conjunto concentra entre el 9 % y el 12 % de la densidad total de polos, representando una de las familias estructurales predominantes en el macizo, vinculada a un sistema de fracturamiento tectónico regional. El segundo conjunto (2_m) se distingue por un buzamiento subhorizontal de 8° y una dirección de buzamiento de 202°. La concentración de polos en esta familia alcanza valores del 7 % al 10 %, lo que sugiere una notable continuidad lateral asociada a planos de estratificación, foliación o superficies de relajación gravitacional por descompresión del macizo. Finalmente, el tercer conjunto estructural (3_m) presenta un buzamiento de 38° con una dirección de buzamiento de 219° (orientado hacia el SW) y densidades de polos que fluctúan entre el 8 % y el 11 %, evidenciando un segundo sistema de fracturamiento inclinado asociado a eventos deformacionales posteriores o a un campo de esfuerzos diferenciado.

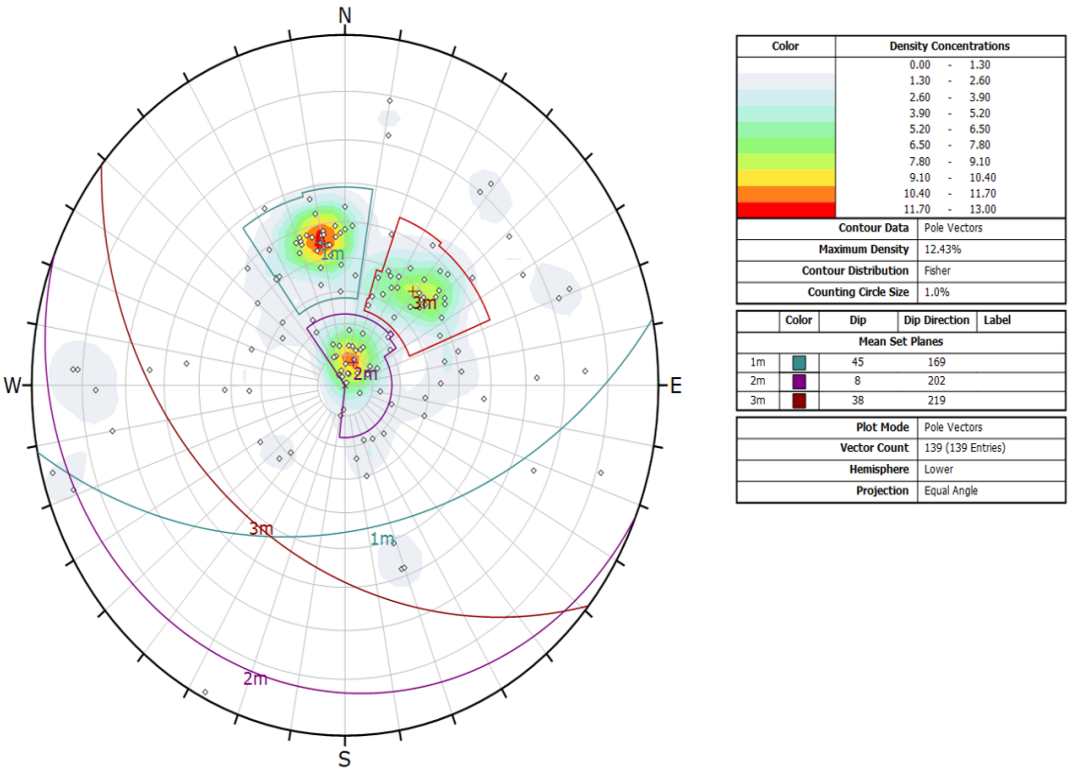


Figura 9. *Polos en 3D vs Campo.*

Fuente: Autores

Desde una perspectiva geomecánica, la coexistencia de estos tres conjuntos genera intersecciones estructurales con capacidad de condicionar el comportamiento mecánico global del macizo rocoso. La intersección geométrica entre los conjuntos 1_m (45°/169°) y 3_m (38°/219°) origina líneas de intersección orientadas preferencialmente hacia el SSW, lo que favorece el desarrollo de mecanismos de falla por cuña, en especial en taludes o excavaciones con orientaciones subparalelas a esta dirección. Igualmente, la presencia de la familia 2_m —con un buzamiento subhorizontal cercano a 8°— establece una condición cinemática propicia para el deslizamiento planar, en particular cuando la inclinación del talud excede el ángulo de buzamiento de dichas superficies y la dirección de la excavación coincide con su dirección de buzamiento. En términos de cuantificación, el hecho de que las concentraciones de polos superen el 10 % de densidad en los núcleos principales denota una alta persistencia geométrica y repetitividad estructural de las discontinuidades, amplificando su influencia en la estabilidad del macizo. Adicionalmente, considerando el radio del círculo de conteo empleado (1 % del área de la proyección), las concentraciones observadas reflejan agrupamientos estadísticamente significativos que respaldan la presencia de tres sistemas estructurales dominantes. En conjunto, estos resultados evidencian que la estabilidad estructural del macizo está gobernada por un sistema triaxial de discontinuidades, donde la interacción entre planos moderadamente inclinados y superficies subhorizontales favorece modos de falla combinados (planar–cuña). Esta caracterización resulta fundamental para el diseño geotécnico de taludes y frentes de excavación, con el fin de mitigar los riesgos de inestabilidad estructural (Figura 9).

Modelos 3D de afloramientos rocosos en realidad virtual

Los resultados obtenidos a partir de la reconstrucción tridimensional del macizo rocoso se incorporaron a un entorno de realidad virtual (RV) con el objetivo de perfeccionar la interpretación geométrica y estructural del afloramiento. La Figura 10 ilustra la implementación del modelo dentro de una plataforma de visualización inmersiva, en la cual el modelo geológico tridimensional se integra en un escenario virtual que reproduce las condiciones topográficas y geomorfológicas del entorno natural. Dentro de este ambiente se aprecia la representación detallada del frente rocoso, donde es posible identificar la estratificación y los planos de discontinuidad caracterizados en las etapas previas, facilitando la evaluación de su continuidad, espaciamiento y relaciones geométricas en un contexto tridimensional a escala real.

Desde la perspectiva geométrica, la integración del modelo 3D en un entorno inmersivo simplifica la visualización espacial de las superficies estructurales y su relación con la topografía circundante. En particular, la plataforma permite reconocer la orientación predominante de los planos estratificados y su interacción con la morfología del talud rocoso. Asimismo, la visualización inmersiva permite examinar la continuidad lateral de los estratos y la persistencia de las discontinuidades, aspectos que resultan difíciles de evaluar mediante representaciones bidimensionales o diagramas estereográficos convencionales. Adicionalmente, el entorno virtual permite simular diversos puntos de observación en el macizo, generando perspectivas equivalentes a levantamientos de campo desde posiciones que en condiciones reales serían inaccesibles o de alto riesgo operacional.

En términos cuantitativos, el modelo virtual integra la información estructural derivada de los análisis de orientación de discontinuidades, posibilitando la representación coherente de las familias estructurales identificadas. Dicha integración simplifica la evaluación de zonas de intersección entre discontinuidades, las cuales constituyen áreas potenciales de formación de bloques o cuñas estructurales. Además, la interacción entre los planos de discontinuidad y la topografía del macizo se valora de forma dinámica, lo que facilita la identificación de sectores donde la orientación estructural podría favorecer mecanismos de inestabilidad de tipo planar o por cuña, especialmente en zonas donde los planos presentan buzamientos cinemáticamente favorables respecto a la inclinación del talud.

Otro aspecto relevante es que el entorno de realidad virtual permite realizar un recorrido interactivo del modelo geológico, lo cual mejora significativamente la percepción espacial tridimensional y la comprensión del patrón de fracturamiento. Este tipo de visualización inmersiva facilita la interpretación de la geometría del sistema de discontinuidades y su conectividad estructural. En consecuencia, el modelo virtual no solo cumple una función de representación gráfica, sino que se constituye como una herramienta analítica complementaria para la caracterización geomecánica del macizo.

Por último, la integración del modelo estructural dentro de un entorno de realidad virtual representa un paso intermedio hacia el desarrollo de modelos geomecánicos avanzados. La disponibilidad de una representación tridimensional coherente permite utilizar esta información como insumo para la construcción de modelos de redes de fracturas discretas (*Discrete Fracture Network*, DFN), en los cuales las orientaciones, densidades y patrones espaciales observados pueden ser incorporados para simular la conectividad hidráulica y estructural del macizo. De este modo, los resultados demuestran que la convergencia entre el modelado tridimensional, el análisis estructural y la visualización inmersiva constituye una metodología sólida para optimizar la caracterización geométrica y avanzar hacia modelos predictivos del comportamiento geomecánico del sistema.

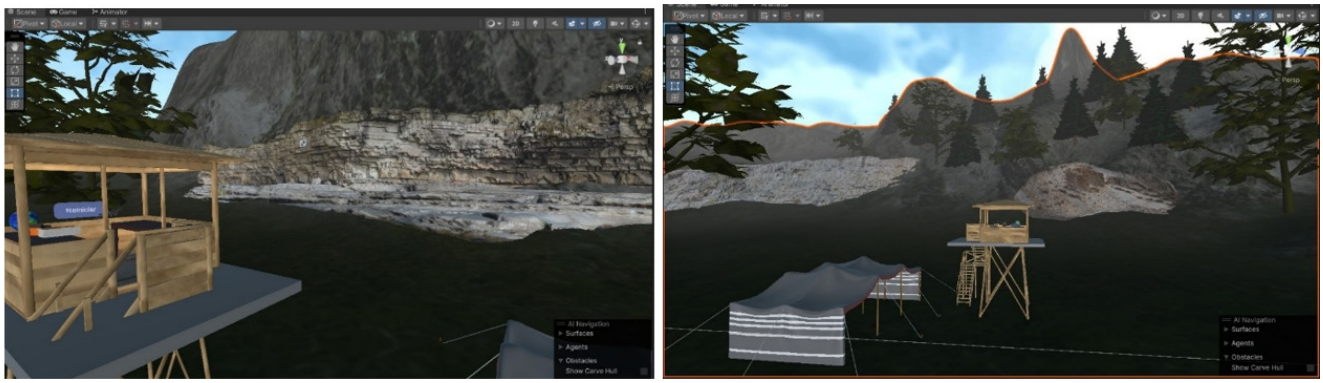


Figura 10. *Ambiente de realidad virtual.*

Fuente: Autores.

Conclusiones

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la integración de la fotogrametría digital de alta resolución con herramientas de visualización en realidad virtual (RV) constituye una metodología sólida y confiable para la caracterización tridimensional de discontinuidades en afloramientos rocosos. A partir del procesamiento de la nube de puntos densa, fue posible reconstruir superficies estructurales con extensiones de 60 m a 65 m de longitud y de 9 m a 11 m de ancho, alcanzando una representación geométrica detallada de la arquitectura del macizo. La comparación entre las mediciones de campo y los valores derivados del modelo 3D mostró diferencias relativas del 8 % en el ángulo de buzamiento (*dip*) y del 4 % en la dirección de buzamiento (*dip direction*), desviaciones situadas por debajo del límite de tolerancia del 10 % (< 10 %) reportado en la literatura especializada, lo que valida la exactitud geométrica del modelo digital para análisis geomecánicos.

Desde la perspectiva estructural, el análisis permitió identificar hasta diez familias principales de discontinuidades, con concentraciones de densidad de polos que alcanzan valores máximos del 12,43 %, lo que evidencia una marcada anisotropía en el macizo rocoso. Las familias dominantes concentran entre el 55 % y el 60 % de las mediciones, indicando que el comportamiento geomecánico está gobernado por un número reducido de sistemas de fracturamiento principales. Asimismo, la caracterización tridimensional permitió estimar parámetros clave como el coeficiente de rugosidad de juntas (JRC) —comprendido entre 10 y 16—, amplitudes de microirregularidades de 3 cm a 12 cm y ondulaciones macroscópicas del 2 % al 4 % respecto a la longitud total de la discontinuidad, parámetros que inciden directamente en la resistencia al corte pico y en la estabilidad global de la masa rocosa.

La integración de los modelos en un entorno inmersivo de realidad virtual optimizó la interpretación geométrica y estructural del afloramiento, facilitando la visualización tridimensional de la continuidad, la conectividad y la intersección entre planos de discontinuidad. Esta estrategia permitió identificar sectores críticos donde la interacción entre familias estructurales favorece la liberación cinemática de bloques potencialmente inestables con volúmenes estimados entre 10^3 m^3 y 10^4 m^3, evaluando con mayor precisión los mecanismos de falla asociados (deslizamiento planar, falla por cuña y vuelco o *toppling*). En comparación con los métodos bidimensionales convencionales, la realidad virtual incrementa la capacidad de análisis espacial y reduce la incertidumbre en la caracterización estructural.

En síntesis, la metodología propuesta garantiza una alta precisión geométrica (errores inferiores al 10 %), permitiendo una caracterización cuantitativa e integral del macizo rocoso que supera la cobertura y representatividad de las técnicas de muestreo tradicionales. La convergencia entre la fotogrametría digital y la realidad virtual se consolida como una herramienta eficaz para el análisis geomecánico, al suministrar insumos confiables para el desarrollo de redes de fracturas discretas (*Discrete Fracture Network*, DFN) y simulaciones numéricas de estabilidad. En consecuencia, este enfoque constituye un

avance metodológico hacia la modelación predictiva del comportamiento de macizos rocosos, con aplicación directa en el diseño de taludes, obras subterráneas, excavaciones y en la gestión integral del riesgo geotécnico.

Referencias

[1] C. Wang, X. Wang, and J. Chen, "Digital Geological Mapping to Facilitate Field Data Collection, Integration, and Map Production in Zhoukoudian, China," 2021, doi: https://doi.org/10.3390/app11115041

[2] R. R. Jones, K. J. W. McCaffrey, R. W. Wilson, and R. E. Holdsworth, "Digital field data acquisition: towards increased quantification of uncertainty during geological mapping," *Geol. Soc. Lond.*, Jan. 2004, doi: https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.239.01.04.

[3] W. Wang, C. Xue, J. Zhao, C. Yuan, and J. Tang, "Machine learning-based field geological mapping: A new exploration of geological survey data acquisition strategy," *Ore Geol. Rev.*, vol. 166, pp. 1–15, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105959.

[4] G. H. Brimhall, J. H. Dilles, and J. M. Proffett, "The Role of Geologic Mapping in Mineral Exploration," *Soc. Econ. Geol.*, Jan. 2005, doi: https://doi.org/10.5382/SP.12.11.

[5] A. Gonzalez-gutierrez, B. Orozco-Rodriguez, W. Ocampo-Ochoa, and D. Manco-Jaraba, "Modelación tridimensional y realidad virtual: una propuesta tecnológica para la educación ambiental y geocientífica," *Prospectiva*, vol. 24, no. 1, pp. 1–10, 2026, doi: https://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3781.

[6] T. L. Pavlis, R. Langford, J. Hurtado, and L. Serpa, "Computer-based data acquisition and visualization systems in field geology: Results from 12 years of experimentation and future potential," *Geosphere*, vol. 6, no. 3, pp. 275–294, Jun. 2010, doi: https://doi.org/10.1130/GES00503.1

[7] M. De Donatis and L. Bruciatelli, "MAP IT: The GIS software for field mapping with tablet pc," *Comput. Geosci.*, vol. 32, no. 5, pp. 673–680, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.09.003.

[8] P. Petrone, V. Allocca, F. Fusco, P. Incontri, and P. De Vita, "Engineering geological 3D modeling and geotechnical characterization in the framework of technical rules for geotechnical design: the case study of the Nola's logistic plant (southern Italy)," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 82, no. 1, p. 12, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s10064-022-03017-y

[9] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds, "'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications," *Geomorphology*, vol. 179, pp. 300–314, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

[10] E. Karantanellis, V. Marinos, E. Vassilakis, and B. Christaras, "Object-Based Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Site-Specific Landslide Assessment," 2020, doi: https://doi.org/10.3390/rs12111711.

[11] F. Brandolini and G. Patrucco, "Structure-from-Motion (SFM) Photogrammetry as a Non-Invasive Methodology to Digitalize Historical Documents: A Highly Flexible and Low-Cost Approach?," 2019, doi: https://doi.org/10.3390/heritage2030128.

[12] F. Gao, W. Tang, J. Huang, and H. Chen, "Positioning of Quadruped Robot Based on Tightly Coupled LiDAR Vision Inertial Odometer," 2022, doi: https://doi.org/10.3390/rs14122945.

[13] L. E. Chesalov, "Digital Technologies in Geology: Status and Prospects," *Autom. Doc. Math. Linguist.*, vol. 59, no. 4, pp. S310–S312, 2025, doi: https://doi.org/10.3103/S0005105525701213

[14] Siefko Slob, Bart van Knapen, Robert Hack, Keith Turner, and John Kemeny, "Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1913, no. 1, pp. 187–194, Jan. 2005, doi: https://doi.org/10.1177/0361198105191300118

[15] M. Sturzenegger and D. Stead, "Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts," *Eng. Geol.*, vol. 106, no. 3, pp. 163–182, 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004.

[16] S. P. Bemis *et al.*, "Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology," *J. Struct. Geol.*, vol. 69, pp. 163–178, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007.

[17] S. I. Jiménez-Jiménez, W. Ojeda-Bustamante, M. D. Marcial-Pablo, and J. Enciso, "Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy," 2021, doi: https://doi.org/10.3390/ijgi10050285.

[18] S. Park and Y. Choi, "Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review," 2020, doi: https://doi.org/10.3390/min10080663.

[19] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 92, pp. 79–97, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.

[20] D. Turner, A. Lucieer, and C. Watson, "An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds," 2012, doi: https://doi.org/10.3390/rs4051392.

[21] A. J. Riquelme, A. Abellán, and R. Tomás, "Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds," *Eng. Geol.*, vol. 195, pp. 185–195, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.009.