UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERILES

SANTIAGO - CHILE

"MAPEO GEOTÉCNICO EN BASE A FOTOGRAMETRÍA CON DRONES Y ESTACIONES ROBÓTICAS"

Presentado por

DIEGO EDUARDO FERNÁNDEZ RIVERA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

Sr. MARCELO PEREZ CONTRERAS

Profesor correferente

Sr. GILBERTO RAMIREZ ALFONSO

JUNIO, 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Geosupport por fomentar y permitir mi desarrollo profesional, por la confianza puesta en mi al hacerme parte de su equipo dentro de la Oficina de Estudios en este año y medio.

Agradezco a Gilberto Ramírez quien me recibió y desde el primer momento permitió que mi estadía fuese productiva y significativa, tanto para mí como para la empresa, al proponerme siempre nuevos desafíos, nuevas tecnologías y diferentes puntos de vista de un mismo fenómeno. A don Guillermo por el espacio y tiempo para desarrollo de este trabajo de título, por sus consejos, conversaciones y experiencia de vida que es de enriquecimiento.

A Roberto Carrasco, Gonzalo Moya, Cristobal Farias por su disposición y tiempo para aclarar mis dudas (constantes) en el uso de los software.

A mi amigo Matías Oyarzo por su amistad, tiempo y dedicación en toda mi formación, que de forma desinteresada podía explicar 10 veces conceptos que no lograba entender jajaja. Por los desayunos, almuerzos y cenas a base de sopaipillas que compartimos. Espero los mejores parabienes para ti, ya que se la calidad de persona y profesional que eres.

A mis profesores del colegio por siempre fomentar mi desarrollo, cada consejo y comentario han hecho posible mi formación (Johanna, Valeria, Ana, Cesar, Cristian Coron), agradezco en especial a la profesora Violeta por interiorizarme en el estudio e interés por las rocas y la química, por mencionarme un día los beneficios que traía estudiar en la Universidad Técnica Federico Santa Maria (en ese entonces no sabía en el tete que me estaba metiendo jajaja).

DEDICATORIA

A Cristo… porque lo que soy y seré es por y para él.

A mi familia… por su tiempo, comprensión, amor y motivación. Gracias por ser mi refugio y fuente de felicidad durante estos años donde me han visto evolucionar profesional y personalmente. Cada felicitación y abrazo cuando aprobaba y avanzaba en mi carrera y por sobre todo la contención en esos momentos cuando llegaba agobiado por las pruebas y sentía que no sería posible llegar hasta este momento. A mi mamá y papá por su sacrificio, por inculcarme los valores que me han hecho la persona que soy, por ser mi ejemplo de vida… ¡¡¡esto es de ustedes!!! He aquí, el primer Profesional Universitario de la familia. A la Naty y Seba por su cariño, apoyo y motivación, por compartir conmigo este camino y motivarlos siempre a alcanzar su máximo potencial donde y como los hagan sentir felices.

A mi Tata y Abuelita por el amor, preocupación y motivación por todos estos años… ¡¡por esas comidas tan buenas los fines de semana!!

A mi tridente, Lucho y Migue, amigos gracias por el apoyo y consejos, las risas, los asados, la buena compañía en estos más de 14 años, a sus familias que son parte de la mía. ¡Sus logros son mis logros, esto también es de ustedes! Un abrazo al mejor abogado y detective de Chile.

A Catalina por ser mi compañera, amiga y confidente. Gracias por tu amor y compañía, por compartir conmigo esta etapa universitaria, el apoyo mutuo en las noches de estudio y por la tranquilidad que me trasmitías cuando teníamos proyectos y pruebas. A toda tu familia por hacerme parte de ella, en especial a la tía, abu y tata gordito.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad: (1) realizar mapeo geotécnico en taludes mineros mediante técnicas de fotogrametría, utilizando la data obtenida desde misiones de vuelo de Drones, permitiendo obtener su caracterización geomecánica; (2) proponer el uso de escáner laser de largo alcance dentro de casetas robóticas, las que mediante el estudio y proceso de la nube de puntos identifiquen los desplazamientos de un área de interés; (3) entregar una alternativa a los métodos tradicionales: campañas en terreno (scanline, sampling windows por profesionales del área in-situ) y topografía tradicional para el cálculo de desplazamientos.

Para ello en una primera etapa se obtiene data desde levantamientos fotogramétricos en Taludes pertenecientes a la fase 3 de producción de Mina El Soldado, Angloamerican. En la segunda, se monitoreo el muro de un tranque de relave durante dos días en un horario preestablecido de una de las principales mineras en Chile.

La data obtenida en la primera etapa es trabajada en software Agisoft, CloudCompare, Discontinuity Set Extractor (DSE) y DIPS, permitiendo extraer las familias de discontinuidades asociadas a todo los Taludes (Fase 3) en cuyo análisis cinemático se detectó una alta probabilidad de ocurrencia de fallas tipo Planar y Toppling Directo, 32% y 51% de estructuras críticas con potencial de fallar, respectivamente. Dada las condiciones geométricas y al estudio del afloramiento de las discontinuidades se tiene que existe 68,8 m^3 de volumen máximo por metro lineal con probabilidad de deslizamiento (asociado a falla planar). Se seleccionó un área de 30x30m asociado a un talud de banco doble de la Fase 3, obteniendo el espaciamiento promedio entre discontinuidades como también la persistencia de éste en el macizo, parámetros que permitieron determinar el índice Rock Quality Designation (RQD) igual a 100; indicando que la calidad del macizo es muy buena.

En tanto la data obtenida a partir de los escáner laser de largo alcance permitieron obtener cuatro nubes de puntos asociadas a cuatro tomas en horario definidos (02:00 AM, 08:00 AM, 14:00 PM y 20:00 PM) para lo cual se estudió y aplicó el algoritmo Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) el que permitió calcular la diferencia de distancias entre nube de puntos, obteniendo que para dos días de registro hubo una diferencia de nivel de tierra de hasta 1,7 m; asociados a los trabajos de movimientos de tierra que efectúan maquinarias (excavadora, bulldozer).

Se concluye con la entrega de un algoritmo de extracción de discontinuidades, cálculo de espaciamiento y persistencia asociados a la metodología del software DSE utilizado en la primera etapa. Correspondiente a un algoritmo desarrollado en lenguaje MATLAB, cuyo código se encuentra liberado y representa una alternativa real para la extracción e identificación de discontinuidades, mediante el uso de nube de puntos obtenidos desde fotogrametría o levantamiento de escáner laser, siendo entonces solo requerido contar con licencia MATLAB (donde la versión R2020a es la recomendada).

ABSTRACT

The present work aims to: (1) carry out geotechnical mapping in mining slopes using photogrammetry techniques, using the data obtained from Dron flight missions, allowing its geomechanical characterization to be determined; (2) propose the use of a long-range laser scanner inside robotic huts, which, through the study and process of the point cloud, identify the displacements of an area of interest; (3) provide an alternative to traditional methods: field campaigns (scanline, sampling windows by professionals from the area in-situ) and traditional topography for the calculation of displacements.

To do so, in a first stage, data is obtained from photogrammetric surveys in slopes of phase 3 of the production of Mina El Soldado, Angloamerican. In the second stage, the wall of a tailings dam was monitored for two days at a pre-established schedule of one of the main mining companies in Chile.

The data obtained in the first stage is worked on in Agisoft, CloudCompare, Discontinuity Set Extractor (DSE) and DIPS software, allowing to extract the families of discontinuities associated with all the Slopes (Phase 3) in whose kinematic analysis highlights a high occurrence probability of Planar and Direct Toppling type of failures: 32% and 51% of critical structures with potential to fail, respectively. Given the geometric conditions and the study of the outcrop of the discontinuities, there is 68.8 m ^ 3 of maximum volume per linear meter with probability of slip (associated with planar failure). A 30x30m area was selected associated with a double bank slope of Phase 3, obtaining the average spacing between discontinuities as well as its persistence in the massif, parameters that allowed determining the Rock Quality Designation (RQD) index equal to 100; indicating that the quality of the massif is very good.

The data obtained from long-range laser scanners allowed four point clouds associated with four shots at defined times (02:00 AM, 08:00 AM, 14:00 PM and 20:00 PM) to obtained, for which the Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) algorithm was studied and applied, which allowed the difference in distances between point cloud to be calculated, obtaining that for two days of recording there was a difference in ground level of up to 1.7 m; associated with earthmoving work carried out by machinery (excavator, bulldozer).

The work concludes with the delivery of an algorithm for the extraction of discontinuities, calculation the spacing and persistence associated with the DSE software methodology used in the first stage. It proposes a free use algorithm and codes in MATLAB language that represent a real and free alternative for the extraction and identification of discontinuities using point cloud obtained from photogrammetry or laser scanner survey.

GLOSARIO

{RQD} Rock Quality Designation

{RMR} Rock Mass Rating

{Jn} Es el índice de diaclasado. Indica el grado de fracturación del macizo rocoso.

{Jr} Es el índice de rugosidad de las discontinuidades o diaclasas.

{Ja} Es el índice de alteración de las discontinuidades.

{Jw} Factor de reducción por la presencia de agua.

{SRF} Stress Reduction Factor, es un factor que evalúa el estado tensional del macizo rocoso.

{SFM} Structure From Motion. Técnica de obtención de imágenes de rango fotogramétrico para estimar estructuras tridimensionales a partir de secuencias de imágenes bidimensionales

{LiDAR} Light Detection and Ranging. Es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de X, Y, Z.

{DSE} Discontinuity Set Extractor. Software desarrollado en lenguaje Matlab permite la extracción de familias de discontinuidades y cálculo de espaciamiento y persistencia de éstas.

{M3C2} Discontinuity Set Extractor.

ÍNDICE

1) INTRODUCCIÓN 13

1.1) OBJETIVOS 14

1.1.1) OBJETIVO GENERAL 14

1.1.2) OBJETIVO ESPECIFICO 14

1.2) ALCANCES 14

1.3) CONTENIDO 15

2) METODOLOGÍA DE TRABAJO 17

3) MARCO TEÓRICO 18

3.1) MAPA GEOTECNICO 18

3.2) METODOS CONVENCIONALES PARA LA CAPTURA DE DATOS 18

3.2.1) MÉTODO LÍNEA DE DETALLE (“SCANLINE”) 19

3.2.2) MÉTODO CELDAS ESTRUCTURALES (“SAMPLING WINDOW”) 20

3.2.3) HOJAS DE MAPEO DE CAMPO 20

3.2.4) DESVENTAJA METODO TRADICIONAL 22

3.3) MÉTODOS PROPUESTOS 23

3.3.1) CONCEPTO DE FOTOGRAMA 23

3.3.2) FOTOGRAMETRÍA 24

3.3.2.1) METODOS FOTOGRAMETRICO EN FUNCION DE DISTANCIA AL OBJETO 28

3.3.2.2) CAPTURA Y TRANSMISIÓN INFORMACIÓN 30

3.3.2.3) STRUCTURE FROM MOTION (SFM) 31

3.3.3) ESCANER LASER TERRESTRE 31

3.3.3.1) CAPTURA Y TRANSMISIÓN INFORMACIÓN 31

3.4) METODOLOGIA CAPTURA, PROCESO Y PRODUCTO TECNOLOGIA PROPUESTAS 32

3.4.1) ANALISIS FOTOGRAMETRICO: DETECCIÓN SEMI AUTONOMATICA DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES Y CLASIFICACIÓN DE NUBES DE PUNTOS 34

3.4.1.1) CÁLCULO LOCAL DE CURVATURAS (PASO 1) 35

3.4.1.2) ANALISIS ESTADÍSTICO (PASO 2) 36

3.4.1.3) ANÁLISIS CLÚSTER (PASO 3) 37

3.4.1.4) RESULTADOS EXPORTADOS 38

3.4.2) ANÁLISIS ESCANER LASER: DETECCIÓN DESPLAZAMIENTO A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS 39

4) MAPEO GEOTÉCNICO 40
4.1) ÁREAS DE ESTUDIO 40
4.1.1) ESTUDIO FOTOGRAMÉTRICO 40
4.1.2) MONITOREO ESCÁNER LASER 41
4.2) SELECCIÓN CAMARA, DRON, ESCÁNER LASER 42
4.3) CAPTURA DE LOS DATOS 48
4.3.1) FOTOGRAMETRÍA 48
4.3.2) ESCANÉR LÁSER 51
4.4) PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN 53
4.4.1) DISCONTINUITY SET EXTRACTOR (DSE) 53
4.4.2) MULTISCALE MODEL-TO-MODEL CLOUD COMPARISON (M3C2) 55
5) ANÁLISIS DE RESULTADOS 57
5.1) ANÁLISIS FOTOGRAMETRICO 57
5.1.1) CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE POLOS 57
5.1.2) IDENTIFICACIÓN VECTORES NORMALES 58
5.1.3) CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES 59
5.1.3.1) DIAGRAMA DE POLOS 61
5.1.4) ANÁLISIS CINEMÁTICO Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA 65
5.1.5) CALCULO DE ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES 71
5.2) ANÁLISIS ESCÁNER LASER 79
6) ALGORITMO MAPEO GEOTECNICO 90
6.1) ALGORITMO IDENTIFICACIÓN DISCONTINUIDADES 90
6.2) ALGORITMO CÁLCULO DEL ESPACIADO NORMAL 92
6.2.1) DATOS DE ENTRADA 92
6.2.2) CÁLCULO DEL ESPACIADO DE DISCONTINUIDAD 3D 93
7) CONCLUSIONES 95
8) BIBLIOGRAFÍA 97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1, Esquema de las propiedades geométricas primarias de discontinuidades en roca. (Hudson et al., 2002)..... 19
Figura 2, Obtención del punto principal a partir de las marcas fiduciales. 23
Figura 3, Restituidor Analógico (Rosado, 2014). 24
Figura 4, Restituidor Analítico (Rosado, 2014). 25
Figura 5, Restituidor digital (Rosado, 2014)..... 25
Figura 6, Fotogrametría espacial..... 26
Figura 7, Fotogrametría aérea. 26
Figura 8, Fotogrametría Terrestre. (Fotogrametría, 2009) 27
Figura 9, Metodología Captura, proceso y productos métodos propuestos: Fotogrametría y Escáner Laser (Elaboración propia)..... 33
Figura 10, Metodología Software DSE para la extracción de las familias de discontinuidades. 34
Figura 11, Descripción de los pasos para construcción de multiscale model-to-model cloud comparison (M3C2) 39
Figura 12, Área de interés para vuelo fotogramétrico..... 40
Figura 13, Clasificación por fase del área de interés en Mina El Soldado, correspondiente a la Fase 3 de producción. Se aprecian además los proyectos expansión norte El Soldado (Galaz, 2017)..... 41
Figura 14, Cámara RGB Zenmuse X4S 42
Figura 15, Dron Matrice 200 DJI 44
Figura 16, Dron M200 con cámara RGB Zenmuse X4S 45
Figura 17, Escáner laser VZ-2000i, Riegl 46
Figura 18, Set fotográfico rajo el soldado obtenido mediante Zenmuse X4S montado en M200..... 48
Figura 19, Ubicación espacial del set fotográfico 49
Figura 20, Nube de puntos densa resultante 49
Figura 21, Nube de puntos en CloudCompare (44.259.197 puntos) 50
Figura 22, Submuestra de la nube de puntos resultante de espaciado minimo de 20 cm (6.408.005 puntos)..... 51
Figura 23, Casetas de monitoreo. Cumplen la función de proteger el escáner laser, además de su fuente de energía (generador petróleo)..... 52
Figura 24, Interfaz de Cloudcompare donde se han cargado la nube de puntos de 08:00 AM y la de 14:00 PM. Para aplicarse complemento M3C2..... 52
Figura 25, Complemento M3C2 con las nubes de puntos cargadas..... 53
Figura 26, Proceso general de trabajo mediante software DSE 54
Figura 27, Esquema representativo de la superposición de las tres nubes de puntos (independientes) obtenidas a partir de los tres escáner laser. Nube de puntos resultante de dicha superposición mediante Cloudcompare..... 55
Figura 28, Proceso general de trabajo mediante complemento M3C2 de Cloudcompare 56
Figura 29, (a) Nube de puntos. (b) Grafico de densidad de vectores normales de los diferentes planos. Se identifican 3 polos principales: J1 (44/273), J2 (3/314), J3 (85/268). isolíneas son graficadas cada 1,25%..... 57

Figura 30, Proyección estereográfica de cada normal con un color asignado..... 58
Figura 31, Representación vectores normales en la nube de puntos de acuerdo con colores de proyección estereográfica..... 58
Figura 32, (a) y (c) Representan nube de puntos y una sección de interés, respectivamente. (b) y (c) Representan la asignación de una familia de discontinuidad a cada punto (familias J1, J2 y J3) y una sección de interés, respectivamente (mediante software DSE)..... 59
Figura 33, Representan la asignación de una familia de discontinuidad a cada punto (familias J1, J2 y J3), mediante software DSE. Los puntos que no están asociados a una familia de discontinuidad no son representados 60
Figura 34, Representación espacial de los 10.000 vectores de los polos. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 62
Figura 35, Función densidad en base 10.000 vectores de polos. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 63
Figura 36, Diagrama roseta con ángulo mínimo de ploteo de 0° 64
Figura 37, Diagrama roseta con ángulo mínimo de ploteo de 45° 64
Figura 38, Identificación de la sectorización de altura de los bancos. 65
Figura 39, Análisis cinemático falla planar. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 66
Figura 40, Análisis cinemático falla planar sin límites. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 67
Figura 41, Análisis cinemático falla por cuña. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 68
Figura 42, Análisis cinemático falla Flexural. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 68
Figura 43, Análisis cinemático toppling directo. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente..... 69
Figura 44, Estudio de afloramiento discontinuidad J1, J2 y J3 a escala banco..... 70
Figura 45, Sección de área seleccionada para estudio (30x30m) de espaciamiento y persistencia de discontinuidades..... 71
Figura 46, Grafico de densidad de vectores normales de los diferentes planos. Se identifican 3 polos principales: J1 (76/222), J2 (51/244), J3 (90/78). isolíneas son graficadas cada 1,25%..... 72
Figura 47, Representación de la clasificación de las tres familias de discontinuidad identificadas. Software CloudCompare..... 73
Figura 48, Análisis estadístico de espaciamiento por Familia de discontinuidades. Función densidad no paramétrica de los valores de espaciamiento: (a) J1, (b) J2 y (c) J3. 75
Figura 49, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J1 asociado a un plano de clúster en específico..... 75
Figura 50, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J2 asociado a un plano de clúster en específico..... 76
Figura 51, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J3 asociado a un plano de clúster en específico..... 76
Figura 52, Persistencia medida (m) en la dirección de Dip, Rumbo, longitud máxima dentro del casco convexo y área (m2), para los tres Set de Discontinuidades (DS)..... 77

Figura 53, Perspectiva de la nube 3D para tres fragmentos de discontinuidad. Tres clúster son identificados como coplanares, generando la “carcasa” convexa de color magenta que permite delimitar el plano. Se identifica la persistencia dirección del Rumbo (strike), Buzamiento (DipDir) y la longitud máxima de la persistencia. 78
Figura 54, Vista en planta de nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 02:00 AM 80
Figura 55, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 02:00 AM 81
Figura 56, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 08:00 AM 82
Figura 57, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 08:00 AM 83
Figura 58, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 14:00 PM 84
Figura 59, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 14:00 PM 85
Figura 60, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 20:00 PM 86
Figura 61, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Captura 20:00 PM. 87
Figura 62, Ortomosaico del muro del tranque de relave estudiado. 88
Figura 63, Huellas de trabajo de excavadoras (imagen superior), equipos estacionados en sectores de trabajo (imagen inferior). 89
Figura 64, Algoritmo Extracción de Discontinuidades con Nube de Puntos 3D 91
Figura 65, Sección transversal ortogonal de la nube de puntos que contiene 6 clúster diferentes. En (a) se considera el espaciamiento entre clúster considerando con persistencia, en tanto (b) muestra el cálculo de espaciamiento considerándolo como no persistente. 93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Descripción del Macizo Rocoso (Wyllie and Mah, 1974). 21
Tabla 2, Descripción de Discontinuidad del Macizo Rocoso (Wyllie and Mah, 1974). 22
Tabla 3, Sistemas espaciales con capacidad estereoscópica (Álvarez and Hugo, 2010). 29
Tabla 4, Ficha técnica cámara Zenmuse X4S. 43
Tabla 5, Ficha técnica Dron DJI M200. 45
Tabla 6, Ficha técnica escáner laser largo alcance VZ-2000i. 47
Tabla 7, Polos principales resultado de la función densidad de polos. (Cono: 30°, Total: 99,9%).. 57
Tabla 8, Identificación de la ecuación de clúster desde el macizo rocoso. Identificando la cantidad total de clúster asociado a cada Familia de Discontinuidad. 61
Tabla 9, Parámetros de diseño minero para Fase 3, Mina El Soldado. 65
Tabla 10, Parámetros banco para análisis cinemático. 66
Tabla 11, Resumen del análisis cinemático de los taludes, mediante análisis probabilístico y estudio de afloramiento de las discontinuidades estudiadas. 70
Tabla 12, Set de discontinuidades extraídas y sus principales propiedades. 78
Tabla 13, Resultados de cálculo de distancia M3C2, de las nubes de puntos para los horarios indicados asociado a la lectura de dos días. 87

1) **INTRODUCCIÓN**

El mapeo de celdas es la técnica tradicional para la toma de información geotécnica en la operación minera. Consiste en un rectángulo dibujado en el frente de estudio, en el que se encierran numerosas fracturas, identificando el número de familias de discontinuidades, para luego proceder al estudio de cada una de ellas. Se toma en cuenta en este análisis la presencia de agua, el espaciamiento de discontinuidades para cada familia, la rugosidad, relleno, el rumbo y manteo de cada una. Este método es utilizado tanto en minería de superficie como subterránea.

El presente trabajo de título está orientado a minería de superficie, por lo que los datos de este mapeo son utilizados para estudiar la estabilidad de los taludes y determinar el ángulo óptimo de talud, junto con entregar una caracterización del macizo rocoso incluyendo en este el análisis de secciones verticales para estabilidad de taludes y caída de roca de bancos superiores (derrumbes). La caracterización del macizo rocoso especialmente el tamaño de bloque In-situ, espaciamiento y características de los sets de discontinuidades, es importante para el uso de predicción de fragmentación en la tronadura.

Existen varios problemas asociados al mapeo tradicional, entre ellos se encuentran que existe solo una cantidad mínima de información tomada en cada celda por las limitaciones de tiempo; el mapeo de celdas requiere que el personal acceda a la pared rocosa, que es insegura; el mapeo de celdas en ocasiones es difícil o imposible de realizar por los problemas de acceso; la toma de datos es manual y subjetiva.

Dado lo anterior es primordial el desarrollo de un nuevo método de captura de datos para elaboración de mapeos geotécnicos, en este sentido se propone el uso combinado de las tecnologías fotogramétricas con Drones y la captura de datos desde estaciones robóticas y software geotécnicos lo cual presenta las siguiente ventajas sobre el método tradicional: se realiza a distancia, lo que mejora la seguridad de la operación; proporciona información del talud completo, sin problemas de acceso; proporciona datos de muy alta resolución, nube de puntos en RGB, Imágenes, Orientación espacial; reduce las influencias humanas y subjetividades del mapeo manual; el uso de imágenes permite obtener mucha más información; permite el uso de herramientas geoestadísticas, que proporciona un análisis mucho más fidedigno de la estabilidad de taludes y los ángulos de los mismos.

Debido a lo expuesto, se requiere de eficacia y seguridad en la captura de datos para la toma de decisiones del área geotécnica. La presente memoria propone una metodología de captura y procesamiento de datos a partir del método de fotogrametría con Drones y estaciones robóticas que permitan el estudio de datos masivos de los taludes mineros, además de desarrollar un algoritmo de procesamiento de la información obtenida que permita unificar los parámetros geotécnicos de interés y reducir la incidencia humana en procesos de trata de data como lo es el reconocimiento de espacio entre set de estructuras, espaciamiento, volumen de diaclasas, frecuencia de espaciamiento, entre otros.

1.1) OBJETIVOS

1.1.1) OBJETIVO GENERAL

Desarrollar mapeo y monitoreo geotécnico en base al uso de fotogrametría con Drones y estaciones robóticas, materializando un algoritmo de procesamiento de la información obtenida, que permita unificar los parámetros geotécnicos de interés y reducir la incidencia humana en procesos de tratamiento de datos.

1.1.2) OBJETIVO ESPECIFICO

- Caracterizar geomecánicamente los taludes del sitio de interés mediante el uso de fotogrametría

- Evaluar la estabilidad de los taludes basado sobre los levantamientos y fotografía de estructuras, incluyendo set de fotogramas, Ortofotos, nube de puntos de alta densidad, Triangulación del sector levantado.

- Desarrollo de algoritmo que sea la base para desarrollo de un software propio que incorpore inteligencia artificial capaz de generar un reconocimiento de espacio entre set de estructuras, espaciamiento, volumen de diaclasas, frecuencia de espaciamiento y otros parámetros geotécnicos.

1.2) ALCANCES

- Análisis cinemático a escala de banco
- Estudio de fallas controladas por discontinuidades (falla planar, cuña, toppling)
- Monitoreo del muro del tranque relaves sin considerar eventos post-tronadura, solo actividades de maquinaria asociadas a 2 días de trabajo.

1.3) CONTENIDO

Capítulo 1 "Introducción": Ya presentando.

Capítulo 2 "Marco Teórico": Se define el estado del arte para la elaboración de Mapeo Geotécnico, tratando los métodos convencionales para la captura de data. Posterior se presentan los Métodos Propuestos: Fotogrametría, Escáner Laser, finalmente se propone la metodología de captura, proceso y productos de las tecnologías propuestas.

Capítulo 3 "Mapeo Geotécnico": Esta etapa consiste en determinar y seleccionar la cámara, Drones y sistema de estación Lidar, además la recopilación de data en bruto a través de Dron y escáner laser.

Se realizará mapeo geotécnico mediante fotogrametría y estudio de nubes de puntos a partir de la captura de escáner laser, para ello se seguirá la siguiente secuencia:

Mapeo geotécnico mediante fotogrametría con Drones:

- Obtención de data en bruto (set de fotos).
- Procesamiento data y desarrollo del análisis fotogramétrico.
- Proceso en software Discontinuity Set Extractor (DSE): detección semi autónoma de familias de discontinuidades y clasificación de nube de puntos.
- Cálculo de espaciamiento y persistencia de discontinuidades detectadas.
- Cálculo de RQD del macizo.
- Análisis cinemático mediante software DIPS de probabilidad de falla.
- Estudio de afloramiento y cálculo de volumen de estructuras criticas detectadas a nivel de escala de banco.

Mapeo geotécnico mediante escáner Laser:

- Obtención de data en bruto (nube de puntos).
- Procesamiento data y desarrollo del análisis data de escáner laser.
- Proceso en software CloudCompare (algoritmo multiscale model-to-model cloud comparison, M3C2): detección desplazamientos a partir de nube de puntos.
- Cálculo de desplazamiento.

Capítulo 4 "Análisis de Resultados": Los datos son trabajados en software específicos de acuerdo con el método utilizado, en específico para la fotogrametría con Drones se utilizará el software DSE para la extracción de las familias de discontinuidades, cálculo de espaciamiento y persistencia, posterior a ello mediante análisis cinemático en software DIPS para estudiar la probabilidad de falla para las estructuras detectadas, junto con los volúmenes asociados a nivel de estudio de banco. Para la segunda etapa se utilizará el algoritmo M3C2 del software Cloudcompare para poder medir la distancia asociada a diferentes nubes de puntos obtenidas de una misma área, permitiendo el cálculo de los desplazamientos asociadas a un periodo de tiempo definido.

Capítulo 6 "Algoritmo (Metodología)": Descripción del algoritmo que permita reconocer el espacio entre set de estructuras, espaciamiento, volumen de diaclasas, frecuencia de espaciamiento y otros parámetros geotécnicos.

Capítulo 7 "Conclusiones": Se expone las conclusiones y recomendaciones más importantes del estudio y se propone nuevos desafíos de investigación.

Capítulo 8 "Referencias Bibliográficas": Se presentan las principales referencias utilizadas en la realización del estudio.

2) **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Para dar cumplimiento de los objetivos del proyecto de memoria se establece la siguiente secuencia de procesos, con el fin de obtener el producto final:

- Estado del arte del mapeo geotécnico.
- Métodos propuestos: fotogrametría y escáner laser.
- Metodología de captura, proceso y productos esperados.
- Mapeo geotécnico mediante fotogrametría:
    - Obtención de datos en bruto (set de fotos).
    - Procesamiento de los datos y desarrollo del análisis fotogramétrico.
    - Proceso en software Discontinuity Set Extractor (DSE): detección semi autónoma de familias de discontinuidades y clasificación de nube de puntos.
    - Cálculo de espaciamiento y persistencia de discontinuidades detectadas.
    - Cálculo de RQD del macizo.
    - Análisis cinemático mediante software DIPS de probabilidad de falla.
    - Estudio de afloramiento y cálculo de volumen de estructuras criticas detectadas a nivel de escala de banco.

- Mapeo geotécnico mediante escáner laser:
    - Obtención de datos en bruto (nube de puntos).
    - Procesamiento de los datos y desarrollo del análisis data de escáner laser.
    - Proceso en software CloudCompare (algoritmo multiscale model-to-model cloud comparison, M3C2): detección desplazamientos a partir de nube de puntos.
    - Cálculo de desplazamiento.

3) **MARCO TEÓRICO**

3.1) MAPA GEOTECNICO

El mapeo geotécnico es la base permanente para el manejo y control durante el ciclo de vida de una mina (subterránea o cielo abierto), en ella se describe sistemática y cuantitativamente las discontinuidades de rocas para el estudio de las condiciones de estabilidad del macizo rocoso. Para ello se toma registro de datos estructurales, se describen las discontinuidades, y se realiza un muestreo geomecánico, ensayos in situ y registro fotográfico. Las propiedades de discontinuidad a medir incluyen Dip, Dip Direction, longitud, espaciado, aspereza, persistencia, apertura, llenado y terminación (Priest, 1993).

El mapeo geotécnico se basa en la evaluación del grado de fracturamiento en el macizo rocoso, mediante la caracterización de redes de fracturas, que comprende la obtención de datos geométricos desde familias de discontinuidades y su subsecuente análisis para encontrar distribuciones estadísticas y relaciones entre parámetros (Zeeb et al., 2013).

Tradicionalmente, los estudios se realizan con una brújula geológica, midiendo la inmersión y la dirección de la inmersión directamente en la discontinuidad, siendo registrada en las hojas de campo, basados en método de línea de detalle “Scanline” y método de celdas estructurales “Sampling Window”.

3.2) METODOS CONVENCIONALES PARA LA CAPTURA DE DATOS

Industrialmente la experiencia y años de ejecución ha dictado que el proceso de captura de datos para elaborar el Mapeo Geotécnico se ejecute de acuerdo con los métodos de línea de detalle “Scanline” o de manera más detallada a través del método de celdas estructurales “Sampling Window”, principalmente limitado por la falta de herramientas robustas acorde a los avances tecnológicos. El International Society of Rock Mechanics, ISRM (Barton, 1978), señala que una correcta representación de la geometría del macizo se basa en la representatividad de la muestra recolectada, vale decir, la muestra debe ser representativa de toda la población de discontinuidades (Davis, 1986; Kulatilake et al., 1993).

3.2.1) MÉTODO LÍNEA DE DETALLE (“SCANLINE”)

Consiste en la lectura de información de orientación, abertura, persistencia, relleno y rugosidad de cada una de las discontinuidades encontradas a lo largo de una línea extendida ubicada en la cara del banco a estudiar, de modo que es similar a realizar una perforación de diamantina.

Tal como se aprecia en la *Figura 1* el mapeo lineal comprende estirar una cinta a lo largo la cara y el mapeo de cada discontinuidad que se cruza con la línea. Las longitudes de línea son normalmente entre 50 y 100 m. Si georreferenciamos los extremos de la línea, permitirá conocer la ubicación de todas las discontinuidades detectadas.

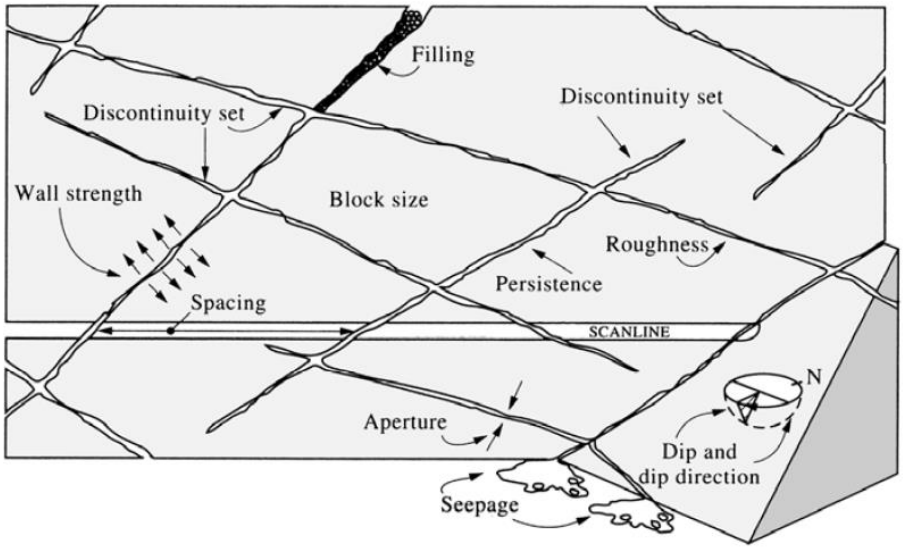


Figura 1, Esquema de las propiedades geométricas primarias de discontinuidades en roca. (Hudson et al., 2002)

3.2.2) MÉTODO CELDAS ESTRUCTURALES (“SAMPLING WINDOW”)

En este método se define un segmento representativo denominado “ventana” de tamaño fijo, el que es espaciado a intervalos regulares a lo largo de la exposición en el que se mapean todas las discontinuidades que quedan contenidas. Las áreas intermedias se examinan por similitud de estructura. Las dimensiones de una ventana normalmente serán de unos 10 m (Wyllie and Mah, 1974).

Esta técnica posee una ventaja significativa y es que, al lograr capturar una mayor densidad de datos, permite una mejor representatividad de los sistemas estructurales del macizo rocoso. Por otro lado generalmente se ve afectada por los sesgos de orientación, truncamiento (probabilidad condicional) y por censura (reportando lo que no es) (Zeeb et al., 2013).

Dependiendo de la extensión de la cara disponible para el mapeo, esta técnica puede utilizarse tanto en el reconocimiento como en etapas finales de diseño de un proyecto. Una correcta identificación de las características de las estructuras tiene un efecto significativo en la estabilidad.

De esta forma el método de Celdas Estructurales permite definir los parámetros de clasificación del macizo rocoso mediante el sistema RMR (Rock Mass Rating) y GSI (Índice de Resistencia Geológica). Además permite la clasificación del macizo rocoso en el Sistema Q mediante la definición de parámetros como RQD, Jn, Jr, Ja, Jw y SRF.

3.2.3) HOJAS DE MAPEO DE CAMPO

Ambas técnicas descritas anteriormente requieren registrar los datos geológicos cualitativos en “hojas de mapeo”

Hoja 1: La hoja de descripción del macizo rocoso describe el material de la roca en cuanto a su color, grano tamaño y fuerza, el macizo rocoso en términos de forma de bloque, tamaño, intemperie y el número de conjuntos de discontinuidad y su espaciado. En la ***Tabla 1*** se presenta la hoja de descripción del Macizo Rocoso con todos los campos disponibles donde se incluye: Información general de la fecha y persona encargada de la toma de data, comentarios, información del material de la roca y descripción de la línea de trabajo empleada.

Hoja 2: Hoja de datos del estudio de discontinuidad, donde se describe las características de cada discontinuidad en cuanto a su tipo, orientación, persistencia, apertura / ancho, relleno, rugosidad de la superficie y flujo de agua. Esta hoja se puede usar para grabar datos de mapeo de afloramiento (o túnel), y datos centrales orientados (excluyendo persistencia y forma de superficie). En la ***Tabla 2*** se presenta la hoja de descripción de Discontinuidades presentes el Macizo Rocoso con todos los campos disponibles donde se incluye: Información general de la fecha y persona encargada de la toma de data, naturaleza y orientación de la discontinuidad y comentarios.

ROCK MASS DESCRIPTION DATA SHEET

GENERAL INFORMATION

Location | Station/Hole No. | Date: Day, Month, Year | Inspector

Locality Type | Slope Length | No. of supplementary sheets of discontinuity data

1. Natural exposure
2. Construction excavation
3. Trial pit
4. Trench
5. Adit
6. Tunnel
7. Drill hole

Slope Height | Sketch | Photograph: Yes

Core Size: N/A

0. No
1. Yes

REMARKS (exposure type/age, stability condition, design issues etc.)

ROCK MATERIAL INFORMATION

Color | Grain size | Compressive strength | Methods to determine compressive strength | Rock Type

1. Light
2. Dark

1. Pinkish
2. Reddish
3. Yellowish
4. Brownish
5. Olive
6. Greenish
7. Bluish
8. Greyish

1. Pink
2. Red
3. Yellow
4. Brown
5. Olive
6. Green
7. Blue
8. White
9. Grey
10. Black

1. Very coarse (>60 mm)
2. Coarse (2–60 mm)
3. Medium (60 μ - 2 mm)
4. Fine (2–60 μ)
5. Very fine (<2 μ)

		MPa
S1	Very soft clay	<0.025
S2	Soft clay	0.025–0.05
S3	Firm clay	0.05–0.10
S4	Stiff clay	0.10–0.25
S5	Very stiff clay	0.25–0.50
S6	Hard clay	>0.50
R0	Extremely weak rock	0.25–1.0
R1	Very weak rock	1.0–5.0
R2	Weak rock	5.0–25
R3	Medium strong rock	25–50
R4	Strong rock	50–100
R5	Very strong rock	100–250
R6	Extremely strong rock	>250

1. Measured
2. Assessed

Qualifying terms to describe rock

ROCK MASS INFORMATION

Fabric | Block size | State of weathering | No. of major discontinuity sets: Line

1. Blocky
2. Tabular
3. Columnar
4. Shattered

1. Very large (>8 m^3)
2. Large (0.2–8 m^3)
3. Medium (0.008–0.2 m^3)
4. Small (0.0002–0.008 m^3)
5. Very small (<0.0002 m^3)

1. Fresh
2. Slightly
3. Moderately
4. Highly
5. Completely
6. Residual soil

LINE SURVEYS TO DETERMINE DISCONTINUITY SPACINGS/ DRILL HOLE ORIENTATION

	Plunge of line / hole	Trend of line / hole	Length of line (m)	No. of Fractures	Spacing	Remarks / True Spacing
Line 1						
Line 2						
Line 3						

Discontinuity spacing

1. Extremely close (<20 mm)
2. Very close (20–60 mm)]
3. Close (60–200 mm)
4. Moderately (200–600 mm)
5. Wide (600–2000 mm)
6. Very wide (2000–6000 mm)
7. Ext. wide (>6000 m)

Tabla 1, Descripción del Macizo Rocoso (Wyllie and Mah, 1974).

DISCONTINUITY SURVEY DATA SHEET

GENERAL INFORMATION

Location | Station / Hole No. | Date: Day, Month, Year | Inspector | Discontinuity data sheet no. | of

NATURE AND ORIENTATION OF DISCONTINUITY

Chainage or Depth	Type	Dip	Dip Direction	Persistence	Termination	Aperture/ Width	Nature of Filling	Strength of Filling	Surface Roughness	Surface Shape	Waviness Wavelength	Waviness Amplitude	JRC	Water Flow	Spacing	Remarks

Type

0. Fault zone
1. Fault
2. Joint
3. Cleavage
4. Schistosity
5. Shear
6. Fissure
7. Tension Crack
8. Foliation
9. Bedding

Persistence

1. Very low persistence	<1 m
2. Low persistence	1–3 m
3. Medium persistence	3–10 m
4. High persistence	10–20 m
5. Very high persistence	>20 m

Aperture/width

1. Very tight (<0.1 mm)
2. Tight (0.1–0.25 mm)
3. Partly open (0.25–0.5 mm)
4. Open (0.5–2.5 mm)
5. Moderately wide (2.5–10 mm)
6. Wide (>10 mm)
7. Very wide (1–10 cm)
8. Extremely wide (10–100 cm)
9. Cavernous (>1 m)

Nature of filling

1. Clean
2. Surface staining
3. Non-cohesive
4. Inactive clay or clay matrix
5. Swelling clay or clay matrix
6. Cemented
7. Chlorite, talc or gypsum
8. Other — specify

Compressive strength of infilling

		MPa
S1	Very soft clay	<0.025
S2	Soft clay	0.025–0.05
S3	Firm clay	0.05–0.10
S4	Stiff clay	0.10–0.25
S5	Very stiff clay	0.25–0.50
S6	Hard clay	>0.50
R0	Extremely weak rock	0.25–1.0
R1	Very weak rock	1.0–5.0
R2	Weak rock	5.0–25
R3	Medium strong rock	25–50
R4	Strong rock	50–100
R5	Very strong rock	100–250
R6	Extremely strong rock	>250

Water flow (open)

0. Discontinuity is very light and dry, water flow along it does not appear possible.
1. The discontinuity is dry with no evidence of water flow.
2. The discontinuity is dry but shows evidence of water flow. i.e. rust staining, etc.
3. The discontinuity is damp but no free water is present.
4. The discontinuity shows seepage, occasional drops of water, but no continuous flow.
5. The discontinuity shows a continuous flow of water (Estimate 1/mm and describe pressure, i.e. low medium, high).

Water flow (filled)

6. The filling materials are heavily consolidated and dry; significant flow appears unlikely due to very low permeability.
7. The filling materials are damp, but no free water is present.
8. The filling materials are wet; occasional drops of water.
9. The filling materials show signs of outwash, continuos flow of water (estimate litres/minute).
10. The filling materials are washed out locally; considerable water flow along out-wash channels (estimate litres/minute and describe pressure, i.e. low, medium, high).

Termination

0. Neither end visible
1. One end visible
2. Both ends visible

Surface shape

1. Stepped
2. Undulating
3. Planar

Surface roughness

1. Rough
2. Smooth
3. Polished
4. Slickensided

Spacing

1. Extremely close spacing	<20 mm
2. Very close spacing	20–60 mm
3. Close spacing	60–200 mm
4. Moderate spacing	200–600 mm
5. Wide spacing	600–2000 mm
6. Very wide spacing	2000–6000 mm
7. Extremely wide spacing	

Tabla 2, Descripción de Discontinuidad del Macizo Rocoso (Wyllie and Mah, 1974).

3.2.4) DESVENTAJA METODO TRADICIONAL

El método de línea de detalle, dado, su metodología de trabajo posee inherentemente errores de sesgo respecto a la orientación relativa entre la discontinuidad y la línea de exploración (Cruden, 1977; Priest and Hudson, 1976; Terzaghi, 1965). Por su parte el muestreo mediante el método de celdas geológicas proporciona datos de mejor calidad en comparación con el uso de líneas de exploración, ya que reduce los errores de sesgo inherentes. Sin embargo, para para reducir el sesgo (mediante una metodología de muestreo adecuada) se requiere la recopilación de una gran cantidad de datos, lo cual en su mayoría puede no ser factible o rentable.

En base a lo anterior se pueden definir una serie de problemas asociados al mapeo tradicional (Ferrero et al., 2014):

- Solo una cantidad mínima de información es tomada de cada celda por las limitaciones de tiempo.
- El mapeo de celdas requiere que el personal acceda a la pared rocosa, que es insegura.
- El mapeo de celdas en ocasiones es difícil o imposible de realizar por los problemas de acceso.
- La toma de datos es manual y subjetiva.
- Sesgo inherente en la metodología de captura de datos.

3.3) MÉTODOS PROPUESTOS

La ubicación y orientación de las discontinuidades de rocas, que tradicionalmente se obtienen de estudios geológicos poseen restricciones principalmente orientados a la seguridad y accesibilidad a la superficie de las rocas. El presente trabajo introduce el uso de métodos de fotogrametría y escáner laser, para realizar estudios más detallados, objetivos y precisos junto con aumentar el área de estudio.

Mediante la técnica de la fotogrametría, se puede extraer una nube de puntos asociada a la cara de los taludes, permitiendo la extracción del conjunto de discontinuidades, su ubicación, Dip, DipDir, espaciamiento y persistencia, logrando el estudio geomecánico del macizo. De igual forma mediante escáner láser, se logra el monitoreo de estructuras mineras, como lo es un muro de tranque de relaves, para lo cual se estudia el desplazamiento de nubes de puntos.

3.3.1) CONCEPTO DE FOTOGRAMA

Se define como una vista aérea del terreno obtenida a partir de una fotografía desde un avión. Para lo cual, los aviones llevan una cámara especial en su suelo con la cual obtienen los fotogramas. Estos fotogramas, además de impresionar cierta superficie del terreno, llevan en sus bordes una serie de datos como son: la distancia focal, altura del vuelo, hora de la toma, numero de orden de la fotografía, entre otras (Santamaría Peña and Sanz Mendez, 2011). Estos poseen un tamaño variable de 18 x 18, 23 x 23 y 30 x 30 cm.

Existen dos condiciones fundamentales para el fotograma. La primera es conocer la distancia focal (precisión de la centesimal de milímetro) y la segunda la proyección de la distancia focal sobre el fotograma, denominado “Punto principal”, el que queda determinado por la intersección de las diagonales del fotograma.

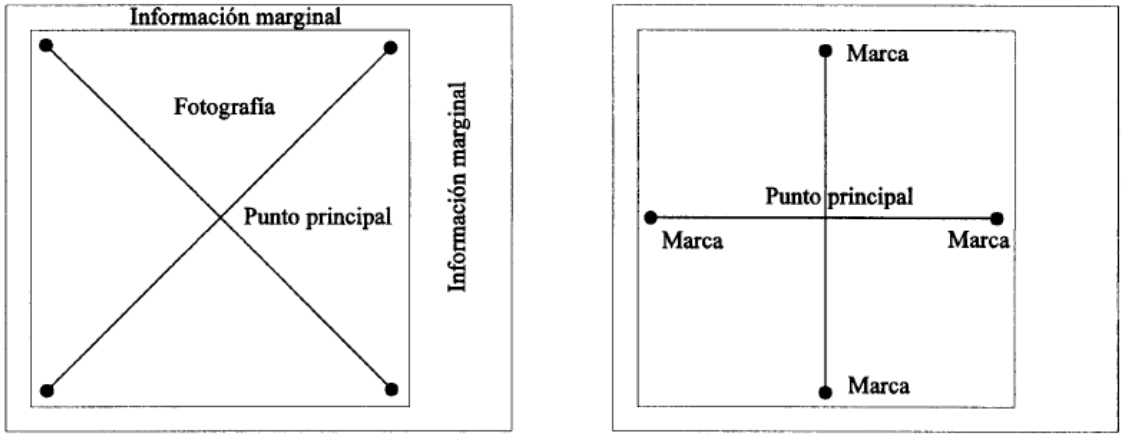


Figura 2, Obtención del punto principal a partir de las marcas fiduciales.

3.3.2) FOTOGRAMETRÍA

Bonneval (1972) define la fotogrametría, como la técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera mediante el uso de una o varias fotografías.

La fotogrametría, de manera general, puede ser entendida como la ciencia y tecnología de obtener información confiable por medio de imágenes obtenidas por sensores (cámaras), siendo el objetivo principal reconstruir un espacio tridimensional a partir de imágenes bidimensionales, esto se produce gracias al fenómeno de estereoscopía el cual requiere de al menos una sobreimposición, entre pares de imágenes, de un 60% lateralmente y un 30% longitudinalmente (Coelho and Brito, 2007; Duelis, 2015).

La fotogrametría permite realizar medidas mediante el uso de fotografías, y su aplicación es extensiva a numerosas áreas. Existe otra técnica que utiliza también fotografías aéreas denominada fotointerpretación y que se dedica al estudio pormenorizado de las fotografías con el objetivo de analizar fenómenos. Sin embargo, la fotogrametría no interpreta fenómenos si no que, mediante mediciones en las fotografías, genera planos y mapas de gran exactitud.

Dependiendo a la instrumentación utilizada o en función de la distancia al objeto, la fotogrametría puede ser clasificada como:

<u>Clasificación Fotogrametría</u>

a) En función del instrumental utilizado

a.1) Fotogrametría Analógica: Fotogramas y equipos analógicos.

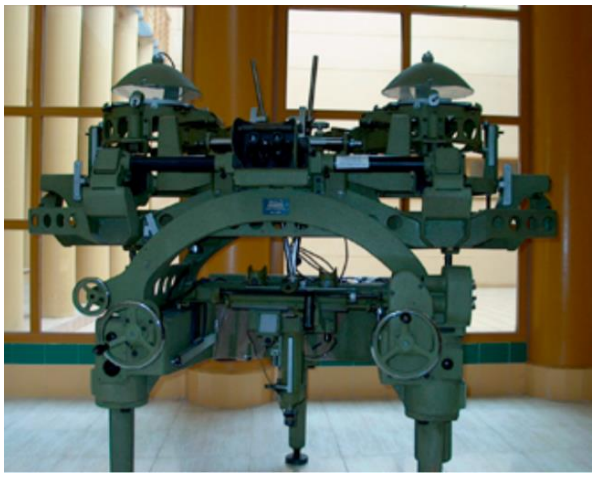


Figura 3, Restituidor Analógico (Rosado, 2014).

a.2) Fotogrametría Analítica: Fotogramas analógicos con técnicas computacionales.

Figura 4, Restituidor Analítico (Rosado, 2014).

a.3) Fotogrametría Digital: Fotogramas y equipos digitales.

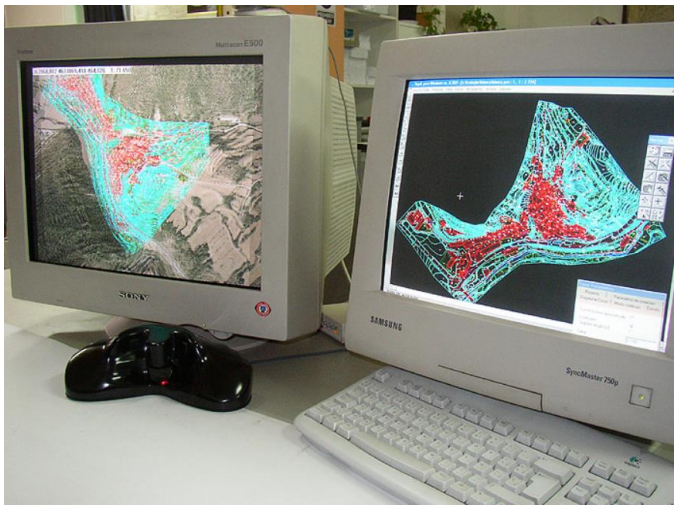


Figura 5, Restituidor digital (Rosado, 2014).

b) En función de la distancia al objeto

b.1) Fotogrametría Espacial: Medición en imágenes de satélite.

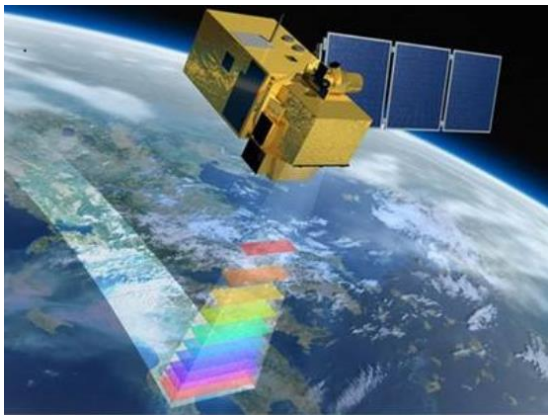


Figura 6, Fotogrametría espacial.

b.2) Fotogrametría Aérea: Fotogramas obtenidos desde misiones de vuelos.

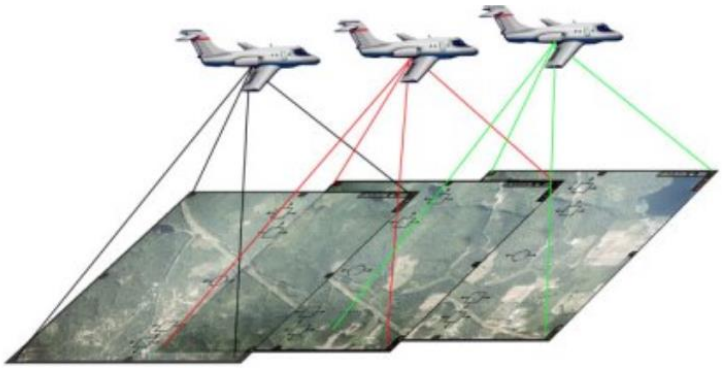


Figura 7, Fotogrametría aérea.

b.3) Fotogrametría Terrestre: Medición en fotogramas obtenidos desde la superficie terrestre.

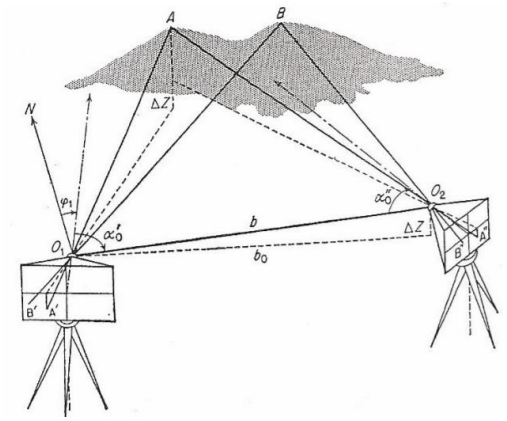


Figura 8, Fotogrametría Terrestre. (Fotogrametría, 2009)

La fotogrametría aérea es la más extendida. En ella a partir de fotografías aéreas tomadas bajo unos condicionantes geométricos, permite elaborar planos y mapas de áreas extensas con exactitud y agilidad. Para un terreno rústico, el límite de rentabilidad para elegir entre un levantamiento fotogramétrico y uno por GPS podría estar en el entorno de unas 200 ha. En el caso de terreno urbano, el límite descendería considerablemente. Aunque todo depende de la escala, exactitud y características del terreno en cuestión (Santamaría Peña and Sanz Mendez, 2011).

La fotogrametría digital tiene sus inicios en los 80’, sin embargo, no es hasta la incorporación de escáner laser y cámaras digitales en los 90’ que tiene su mayor impulso como herramienta que permite la incorporación de imágenes digitales como fuente de datos (Coelho and Brito, 2007).

3.3.2.1) METODOS FOTOGRAMETRICO EN FUNCION DE DISTANCIA AL OBJETO

FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE

En este método los fotogramas son obtenidos desde la tierra, mediante campañas en terreno donde se ubican los equipos fotográficos a distancias inferiores a 200 metros de la zona a restituir, proporcionando una precisión de hasta 40 mm. Este sistema es más apropiado para el estudio de fenómenos de pequeña envergadura que ocupan áreas reducidas.

El método de trabajo no requiere de métodos topográficos que entreguen las coordenadas del centro de proyección. Por lo que lo único que se requiere es definir 2 puntos y asignarles coordenadas. Luego definir las coordenadas de los centros de proyección, definiendo las coordenadas de los puntos de apoyo para así definir los ejes (*Fotogrametria*, 2009).

La incorporación de nuevas tecnologías y la reducción en los costos asociados al escáner laser, ha generado que la fotogrametría terrestre haya sido sustituida por procesos que permitan dar respuesta a:

- Necesidad de efectuar levantamiento en corto tiempo y en gran extensión de área
- Levantamiento en sectores con relieve muy escarpado o de difícil acceso
- Condiciones de Inestabilidad del terreno

FOTOGRAMETRÍA AÉREA

La fotogrametría aérea corresponde el área de mayor extensión y desarrollo, motivado por el avance tecnológico de los aviones no tripulados (UAV de acuerdo a sus siglas en ingles) en los últimos años, que han permitido mayor precisión en la fotogrametría, debido a las resoluciones de los pixel que pueden ser menores a 1 cm. Otro factor que influye es que estos sistemas vuelan a menor altura y no necesitan de gran cantidad de puntos de apoyo GCP, debido al modelamiento matemático para efectuar aerotriangulación y densificación de puntos.

A diferencia de la fotogrametría terrestre, la cámara se sitúa sobre una plataforma aérea (avión o helicóptero), siendo la altura de vuelo inferior a 500 metros.

La precisión obtenida con la fotogrametría aérea tripulada es de unos 100 mm, barriendo amplias áreas. El procesado de las imágenes permite construir un modelo digital del terreno (MDT) de la zona de interés. La comparación de los MDTs obtenidos en diferentes intervalos de tiempo a través de la fotogrametría, permite comparar los cambios superficiales que se han producido en la zona.

La principal ventaja de la fotogrametría es que permite obtener una visión global de la zona estudiada y no sólo de algunos puntos de esta, tal y como ocurre con otros métodos de control.

FOTOGRAMETRÍA SATELITAL

Se basa en los mismos principios que la aérea. La diferencia radica en que las imágenes estereoscópicas son adquiridas desde una plataforma espacial. Hasta el momento las precisiones conseguidas son bajas (a escala de metros). No obstante, la mejora de las imágenes de satélite introducida por una nueva generación de satélites.

El primer satélite con capacidad de tomar datos estereoscópicos fue el SPOT en 1986, posterior a él se han desarrollo numerosos satélites como el *ASTER*, IKONOS, QUICKBIRD, ROCSAT, IRS-PS. Los cuales son capaces de adquirir dos imágenes en una misma órbita, lo que ha permitido que la fotogrametría de satélite pueda llegar a competir con la fotogrametría aérea, permitiendo la fotointerpretación manual o la correlación automática de los pares. En la ***Tabla 3*** se presente el detalle de los Sistemas Satelitales con capacidad estereoscópica a la fecha indicando consigo la Resolución Espacial en unidad de metro.

Sistema	**Resolución Espacial (m)**	**Fecha Lanzamiento**
SPOT 1-2-4	10	1986
ADEOS	8	1996
MOMS-2	6	1996
CBERS	20	1999
TERRA-ASTER	15	1999
KOMPSAT-1	6.6	1999
IKONOS	1	1999
EROS A	1.8	2000
TES	1	2001
QuickBird	0.72	2001
SPOT 5	5	2002
BILSAT	12.6	2003
ResourceSat	5.8	2003
Orb View 3	1	2003
RocSat	2	2004
IRS-PS	2.5	2005
ALOS	2.5	Pendiente

Tabla 3, Sistemas espaciales con capacidad estereoscópica (Álvarez and Hugo, 2010).

3.3.2.2) CAPTURA Y TRANSMISIÓN INFORMACIÓN

La fotogrametría proporciona las coordenadas 3D de los puntos con una precisión predecible desde imágenes estéreo o múltiples (es decir, desde imágenes de la misma escena tomadas desde diferentes puntos de vista). La precisión de las coordenadas depende de varios factores, que deben tenerse en cuenta al diseñar las tres etapas de cualquier levantamiento fotogramétrico: calibración de la cámara, orientación de la imagen y restitución de objetos. La calibración de la cámara, que se repite periódicamente, determina los parámetros de la lente y la cámara de orientación interior en el laboratorio. Los parámetros de orientación exterior (posición y actitud de la cámara con respecto al sistema de referencia de objetos en cada estación) se calculan indirectamente midiendo las coordenadas de imagen de puntos con coordenadas de objeto conocidas (GCP, puntos de control de tierra), inspeccionados, por ejemplo, por estaciones totales. Para un solo par estéreo, se necesitan cuatro GCP para asegurar una buena precisión; con grandes caras de roca, para las cuales se necesitan varias imágenes, la orientación simultánea de un bloque completo de imágenes superpuestas permite una reducción muy significativa del número de GCP, con una pérdida insignificante de precisión, al medir los puntos de unión en las imágenes (Kraus et al., 2000).

El uso de la coincidencia de imagen basada en características y la estructura del movimiento se pueden extraer y unir automáticamente, por lo que la orientación de la imagen se puede obtener sin ninguna medición manual (Birch, 2006; Roncella et al., 2005). Los parámetros de orientación también se pueden determinar directamente, fijando a la cámara un receptor del sistema de posicionamiento global (GPS), integrado con una unidad de medición inercial (IMU) (Vallet et al., 2000). En este caso, no se necesitan GCP, sin embargo, una señal GPS debe estar disponible casi continuamente para que los datos de orientación sean precisos. Por lo tanto, estos sistemas se utilizan mejor ya sea en el aire o donde la visibilidad satelital desde las estaciones de cámara no está severamente limitada por obstáculos como la vegetación alta o las caras de las rocas sí mismos.

3.3.2.3) STRUCTURE FROM MOTION (SFM)

Corresponde a una técnica de fotogrametría digital que permite obtener una nube de puntos con una calidad aceptable condicionada a la calidad de la cámara digital empleada, la técnica de adquisición de las imágenes y el software para procesarlas.

El proceso requiere incorporar información geométrica a las fotografías. Además, se requiere (con apoyo de software, tales como Agisoft Photoscan) otorgar puntos de control en la fotografía (GCP, Ground Control Point) que permite asignar coordenadas en un sistema de referencia global o local a un mismo pixel en distintas fotografías.

Es en base a lo anterior que la nube de puntos generada tendrá menor error y estará escalada y orientada de acuerdo con el sistema de referencia asignado. Lo anterior es recomendado dado que, al no utilizar puntos de control, la nube de puntos resultante no estaría orientada ni escalada, siendo factible al efecto bóveda o domo que introduce distorsiones y por lo tanto error en el conjunto de puntos (James y Robson, 2014)

La técnica SFM permite reconstruir una escena tridimensional a partir de una serie de imágenes bidimensionales adquiridas por un sensor en movimiento.

3.3.3) ESCANER LASER TERRESTRE

El láser escáner terrestre es un dispositivo de adquisición de datos masivos, que genera una nube de puntos tridimensional, a partir de la medición de distancias y ángulos, mediante un rayo de luz láser.

Básicamente es una estación topográfica de medición sin prisma, que realiza observaciones masivas sobre áreas preseleccionadas.

3.3.3.1) CAPTURA Y TRANSMISIÓN INFORMACIÓN

Los datos de detección y alcance de luz (LIDAR) son una fuente de datos primaria para la generación de DTM; se pueden operar desde tierra, como un sistema independiente o en sistemas aéreos, en este último caso integrados con un sistema de navegación. Los componentes principales de un sistema LIDAR son un telémetro láser y un mecanismo de escaneo.

Se utilizan dos principios de medición de distancia: la mayoría de los láseres de corto alcance (hasta 50–100 m) funcionan con el principio de cambio de fase (onda continua); Los sistemas de largo alcance (que son menos precisos) normalmente funcionan con el principio de pulso (tiempo de vuelo).

Los escáneres láser terrestre y aéreo difieren en la forma en que la información de distancia es combinada para proporcionar la posición de destino.

En la mayoría de los escáneres terrestres, el escaneo se obtiene combinando un espejo y una cabeza giratorios montada en ejes ortogonales. Las coordenadas polares del objetivo luego se convierten en un marco instrumental con su origen en el centro del instrumento, el eje z a lo largo del eje de rotación y el eje x en una dirección arbitraria. Hay varios sistemas disponibles, adecuados para diferentes aplicaciones. En el contexto de la generación de nubes de puntos para caras de roca, los rangos máximos de operación de los escáneres actuales varían desde aproximadamente 100 m hasta 800 m y más, con precisiones de coordenadas 3D en el rango de 0.5–3 cm y velocidad de escaneo de 2,000 a 12,000 $pts \cdot s^{-1}$. La precisión en el rango disminuye con la distancia objetivo y la reflectividad del objetivo; debido a la divergencia del haz (del orden de 0.2–0.25 mrad) y de la apertura óptica, la huella láser es un disco de diámetro variable (hasta unos pocos centímetros), y por lo tanto el rango medido es de hecho un valor promedio. Un ángulo de incidencia grande a la superficie normal conduce a la elipticidad del disco y aumenta la incertidumbre de la medición (Ferrero et al., 2009).

Las resoluciones de exploración angular son del orden de 100 µrad y permiten una densidad de muestreo muy alta en el objeto en tiempos de adquisición relativamente cortos, lo que resulta en millones de puntos medidos en la superficie del objeto, sin embargo, debe tenerse en cuenta que la resolución angular real también depende de la divergencia del haz (Lichti y Jamtsho, 2006).

Dado que las coordenadas medidas se refieren a un sistema de referencia instrumental, los objetivos se establecen en puntos de referencia para calcular una transformación espacial (conforme) del instrumento al marco del objeto. Del mismo modo, si se deben unir varios escaneos para completar el DTM de un área grande o para proporcionar diferentes puntos de vista para evitar oclusiones, es necesaria una transformación a una referencia común. Para este objetivo, registro basado en puntos (preciso y confiable) o coincidencia de superficie (automatizado, pero menos exacto) se puede aplicar. En el primer método, se encuentran disponibles varios enfoques analíticos que permiten el registro simple de escaneos por pares o el registro simultáneo (una técnica similar al ajuste de bloque en la fotogrametría) de todos los escaneos. Los mejores resultados se obtienen al usar como puntos comunes en la transformación objetivos altamente reflexivos (y a menudo de forma esférica), bien distribuidos en el área de escaneo, que se pueden detectar de forma automática y muy precisa en la nube de puntos.

3.4) METODOLOGIA CAPTURA, PROCESO Y PRODUCTO TECNOLOGIA PROPUESTAS

En la ***Figura 9***, se presenta una metodología secuencial de los distintos procesos, detallando captura, procesamiento de la data con el fin de obtener los productos.

El proceso secuencial de esta metodología se divide en los siguientes puntos:

- Obtención de los Datos en Bruto “Set de Fotos/Nube de puntos”.
- Proceso de Fotogrametría.
- Proceso de Escáner Laser.

- Nube de puntos.
- Filtro y limpieza de nube de puntos.
- Ortofotos.
- Revisión y Control de Calidad en cada etapa.

El proceso concluye con la elaboración de los distintos productos, entre los cuales destaca, las Ortofotos provenientes del proceso de fotogrametría las que luego de ser procesada entregan una nube de punto con los que trabaja en software Discontinuity Set Extractor (DSE) para la extracción de las familias de discontinuidades y el cálculo de espaciamiento. Luego mediante algoritmo M3C2 se calcula el desplazamiento que sufre las nubes de puntos, logrando determinar las diferencias en los niveles del terreno.

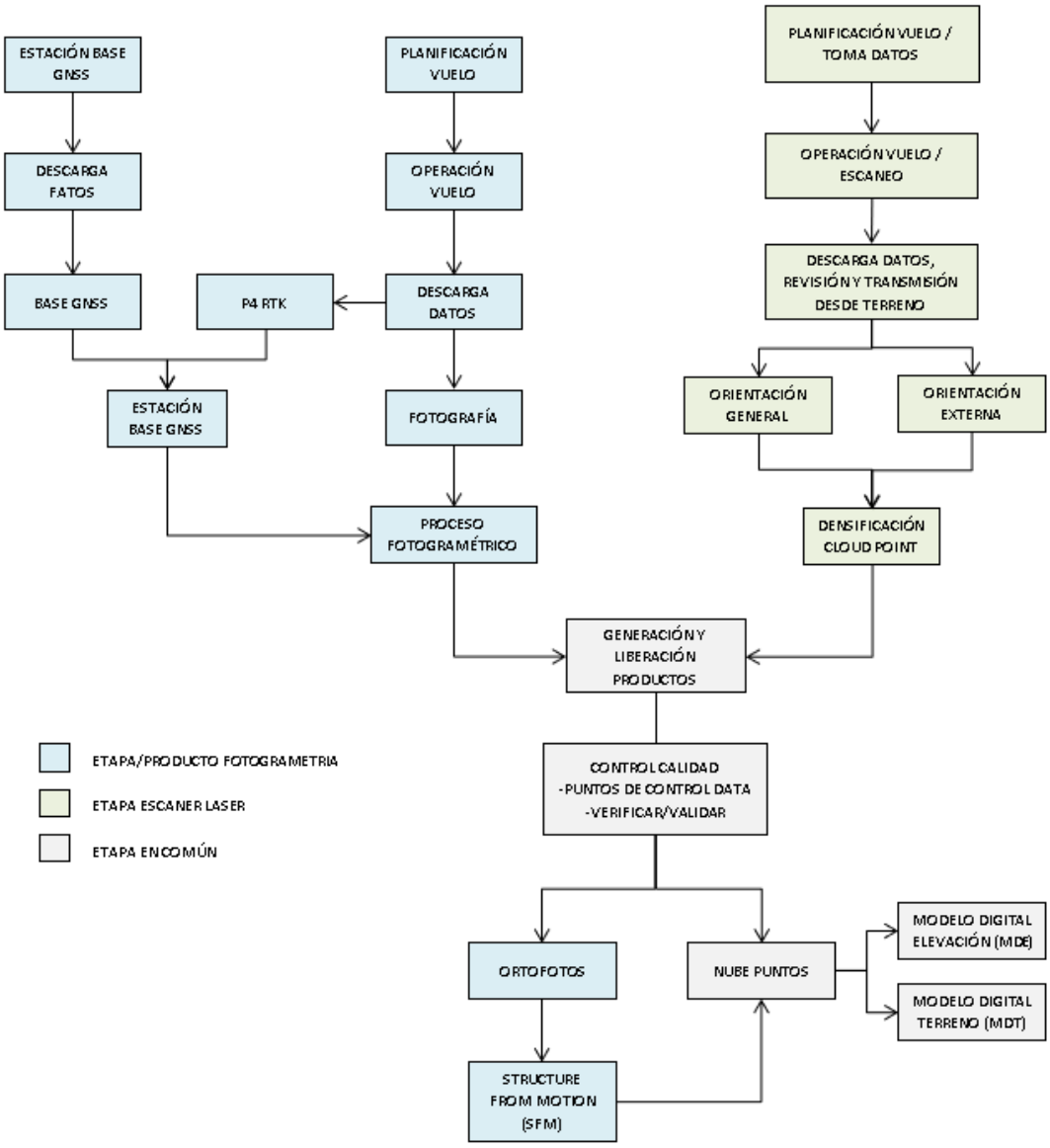


Figura 9, Metodología Captura, proceso y productos métodos propuestos: Fotogrametría y Escáner Laser (Elaboración propia).

3.4.1) ANALISIS FOTOGRAMETRICO: DETECCIÓN SEMI AUTONOMATICA DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES Y CLASIFICACIÓN DE NUBES DE PUNTOS

El análisis fotogramétrico tendrá como objetivo que a partir de la nube de puntos 3D del talud minero se detecten las familias de discontinuidades y los planos expuestos en su superficie. Permitiendo clasificar cada punto perteneciente a una familia y aun plano expuesto con su ecuación analítica (***Ecuación 1***) o bien considerarlo un punto aislado para no formar parte de ningún plano:

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

Ecuación 1, Ecuación analítica de plano asociado a una familia de discontinuidad

La detección de familias de discontinuidades se lleva a cabo mediante el uso del software Discontinuity Set Extractor (DSE) que permite trabajar con tres métodos de adquisición: (1) Datos sintéticos, correspondientes a nubes de puntos generadas con códigos de MATLAB que representan figuras conocidas, (2) Structure from Motion (SfM), técnica fotogramétrica que permite obtener nube de puntos mediante cámara digital, (3) Escáner Laser 3D, escaneado de superficies emitiendo y recibiendo el tiempo de vuelo o la fase de la onda de un haz de luz de tal forma que miden la distancia a la que se encuentra el punto reflector.

La metodología se basa en tres pasos: (paso 1) Cálculo local de curvaturas, (paso 2) Análisis estadístico y (paso 3) Análisis de clúster

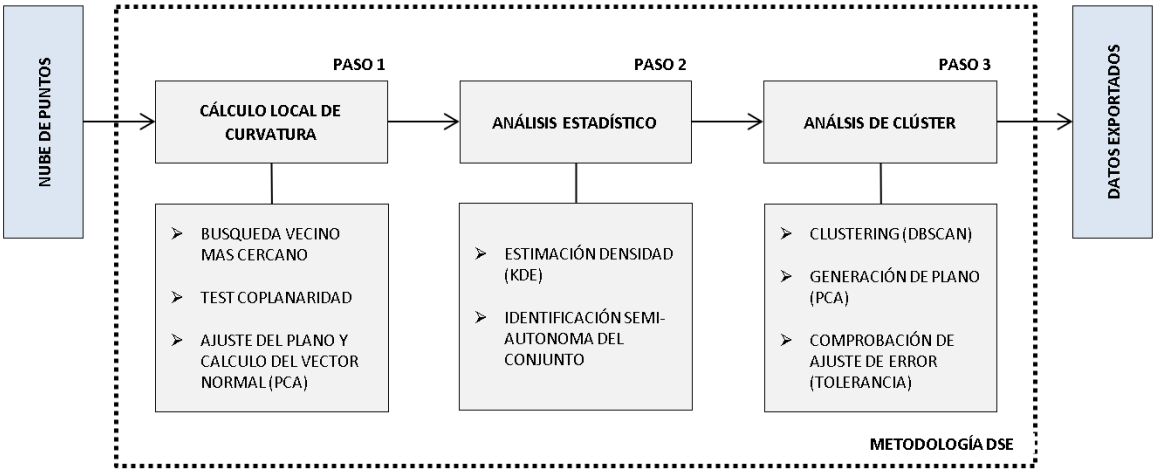


Figura 10, Metodología Software DSE para la extracción de las familias de discontinuidades.

3.4.1.1) CÁLCULO LOCAL DE CURVATURAS (PASO 1)

Para cada punto de la nube se buscan los k vecinos más cercanos, según la distancia definida por una norma euclidiana en R^3. El valor del parámetro knn se define antes de iniciar el proceso. La programación de la búsqueda de los puntos más cercanos se ha llevado a cabo empleando la función "knnsearch" en MATLAB.

El conjunto formado por el punto estudiado y sus vecinos se denominó $\mathrm{Q_i}$. Este conjunto al formar parte de la superficie se evalúa si formar parte de una superficie plana, para lo cual se realiza un test de coplanaridad. Para efectuar este test se utiliza el análisis de los componentes principales (Pearson, 1901) en MATLAB, mediante la orden "princomp". El test PCA aplicado al conjunto de puntos $\mathrm{Q_i}$ devuelve de tres vectores principales $(\vec{\mathrm{v}}_1, \vec{\mathrm{v}}_2, \vec{\mathrm{v}}_3)$ y tres valores propios $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, dado que solo se analizan dimensiones. Los valores propios se ordenan de mayor a menor, donde λ_1 el mayor y correspondiente aquella dirección que más datos explica. El tercer y menor valor propio λ_3 proporciona información acerca de la dimensión que menos datos explica $(\vec{v}_3)$. Si el conjunto se distribuye según un plano, el porcentaje que supone este λ_3 sobre la suma de los tres valores propios deberá ser inferior a cierto número o umbral, el cual es definido por el usuario. Este valor se ha llamado tolerancia y se define según la ***Ecuación 2***:

$$\eta = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

Ecuación 2, Tolerancia

El test de coplanaridad consiste en considerar cuán plano es el conjunto Q_i asociado al punto i de la nube de puntos. Para cada punto i se calcula el valor de su tolerancia η_i , y si este valor es inferior o igual a un valor definido por el usuario, el punto se acepta, pero sí no lo supera se rechaza y se elimina del proceso. Con los puntos que han superado el test de coplanaridad y sus vecinos, se calcula el vector normal con los dos vectores propios asociados a cada conjunto de puntos.

3.4.1.2) ANALISIS ESTADÍSTICO (PASO 2)

Los vectores normales asociados a cada punto que ha superado el test de coplanaridad se analizan con el fin de detectar las orientaciones en la superficie definida por la nube de puntos. Si esta superficie se organiza según planos, es esperable que los polos de los vectores normales se concentren en una zona de la proyección estereográfica alrededor de un polo, que se denomina polo principal. Este será el más representativo del conjunto y con él se define la orientación de la familia de planos o planos principales. Para llevar a cabo este análisis estadístico se representan todos los polos de los vectores normales en proyección estereográfica y se analiza su densidad. A continuación, se enumeran los pasos seguidos para determinación estadística de los polos principales:

1. Se representan todos los polos asociados a los puntos que han superado los requisitos anteriores en proyección estereográfica.

2. La densidad de los puntos se calcula mediante la estimación no paramétrica que proporciona la técnica del KDE. Esto permite representar la función de densidad mediante una superficie que muestra peaks en los valores máximos.

3. Antes de la extracción de los planos principales, se establece el ángulo mínimo que deben formar dos vectores normales correspondientes a los planos principales para que sean considerados como tal.

4. La elección de los planos principales se puede efectuar automática o manualmente. La forma automática requiere el establecimiento del número n de planos principales a extraer, con lo que se extraen los n peaks máximos relativos de la función de densidad que cumplen la condición anterior. La elección manual permite modificar la automática y ajustar, insertar o eliminar planos principales propuestos.

5. Finalmente, se lleva a cabo una asignación de un plano principal a cada punto. El proceso consiste en establecer el ángulo mínimo que debe formar el vector normal asociado al punto con el del polo principal. Por tanto, a un punto se le asignará el plano principal cuyo menor ángulo forme con su vector normal siempre que no supere cierto valor definido. Aquellos puntos que no hayan sido asignados a ningún plano principal se descartan. Al final de este proceso se tiene la nube de puntos con los vectores normales correspondientes y el plano principal (o familia de planos) que se le ha asignado.

3.4.1.3) ANÁLISIS CLÚSTER (PASO 3)

El último paso es clasificar espacialmente los puntos que, perteneciendo a una misma familia de discontinuidades, se agrupan formando superficies planas. Si los puntos forman planos tendrá, al menos, cierta continuidad en el espacio con una clara separación espacial. De esta forma habrá que buscar aquellos conjuntos de puntos que, siendo miembros de una misma familia, formen un conjunto con una densidad continua. A estos conjuntos de puntos o agrupaciones los llamamos clúster.

El análisis de clúster se realiza con la técnica del DBSCAN (Ester et al., 1996). La técnica fue adaptada al análisis de R^3 y programada en MATLAB (Riquelme Guill, 2015). Este método requiere establecer un radio de búsqueda para identificar si el punto estudiado y sus vecinos más cercanos tienen suficiente densidad, y por tanto pertenece al clúster. De acuerdo a lo recomendado por Ester et al. (1996), el radio de búsqueda se estableció a partir de la distancia al cuarto vecino más próximo de la familia mediante un análisis estadístico. Este radio se establece independientemente para cada familia. Al final de este proceso se obtiene la nube de puntos con los vectores normales correspondientes, el plano principal y el clúster al que pertenece.

Luego se calculan las ecuaciones del plano de cada clúster. Posteriormente, se analizó si dos clústeres miembros de la misma familia con el mismo vector normal son miembros del mismo plano.

Al considerar que los puntos no se ajustan a un plano perfectamente se incorpora cierto error, por lo que el establecer sí dos clústeres pertenece al mismo plano no es inmediato.

A pesar de calcular todos los planos de la familia con el mismo vector normal, el término independiente D (de la Ecuación **1**) no tiene por qué ser el mismo, aunque realmente pertenezcan a la misma discontinuidad plana. Sin embargo, es posible efectuar un test que determine si existen indicios razonables para considerar los dos planos como miembro de uno mismo. El test consiste en calcular la distribución distancia punto-plano de dos clúster y analizar cuánto se solapan. Si el grado de solape entre ambas es mayor o igual que el que define el usuario, se acepta que ambos clúster forman parte del mismo plano. En ese caso, se toma el término independiente D del plano del clúster con mayor número de puntos y se le asigna al otro clúster.

3.4.1.4) RESULTADOS EXPORTADOS

El output del método es el conjunto de puntos clasificado con la siguiente información:

$\{x\}$ coordenada cartesiana x del punto original

$\{y\}$ coordenada cartesiana y del punto original

$\{z\}$ coordenada cartesiana z del punto original

$\{f\}$ identificador de la familia de planos a la que pertenece el punto

$\{cl\}$ identificador del clúster o agrupación de punto miembros de la misma especie plana a la que pertenece el punto

$\{A\}$ parámetro A de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ***Ecuación 1***. Es La componente de eje X del vector normal al plano.

$\{B\}$ parámetro B de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ***Ecuación 1***. Es La componente de eje Y del vector normal al plano.

$\{C\}$ parámetro C de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ***Ecuación 1***. Es La componente de eje Z del vector normal al plano.

$\{D\}$ parámetro D de la ecuación del plano al que pertenece el punto según la ***Ecuación 1***. Determina la posición en el espacio del plano.

3.4.2) ANÁLISIS ESCANER LASER: DETECCIÓN DESPLAZAMIENTO A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS

El algoritmo M3C2 calcula una distancia media local de nube a nube para un punto en la nube de referencia, denominado punto central, mediante la proyección de un cilindro de búsqueda a lo largo de un vector normal orientado localmente. Posteriormente la distancia es asignada como un atributo del punto central. En la **Figura 11** se pueden observar los pasos para la construcción del M3C2: (a) Paso 1, el vector normal local "N" es estimado desde la nube de puntos 1, ajustando un plano a los puntos dentro de un radio de $D/2$ desde P_{core} (correspondiente a un punto central escogido dentro de un cilindro de búsqueda asociado a la nube de puntos); (b) Paso 2, se proyecta un cilindro desde P_{core} a lo largo de un vector normal. El promedio de la posición es calculado para cada nube, a lo largo del vector normal, usando los puntos contenidos dentro de cada cilindro. Donde finalmente la diferencia entre el promedio de las posiciones es la distancia M3C2.

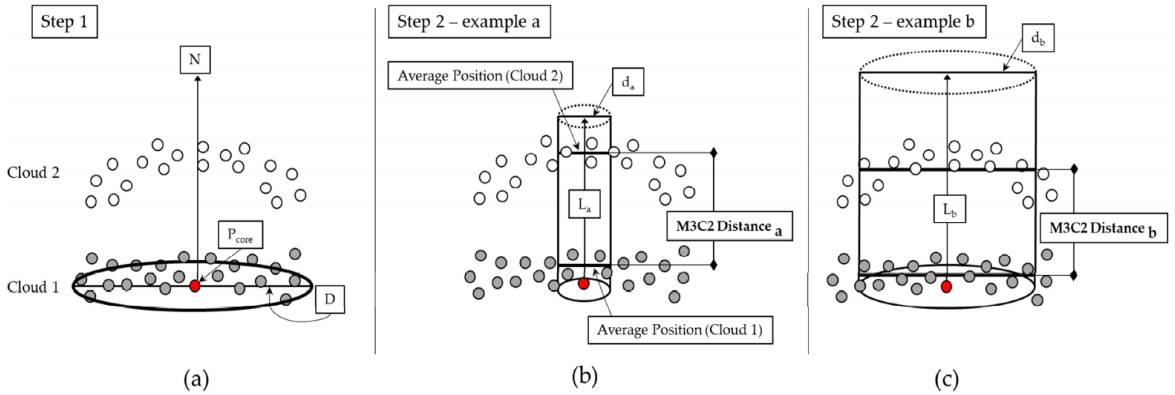


Figura 11, Descripción de los pasos para construcción de multiscale model-to-model cloud comparison (M3C2)

La proyección del diámetro d_a y la altura máxima L_a son definidos por el usuario; (c) Paso 2 se muestra con un diámetro de proyección más grande d_b, lo que resulta en un mayor promedio espacial en el cálculo de la distancia. También se muestra una longitud de búsqueda mayor L_b. El cilindro de búsqueda se proyecta en ambas direcciones, buscando la nube 2.

El vector normal del punto central se estima a partir de su vecindario circundante, que debe ser de una escala tal que capture la geometría de la superficie sin ser sensible a la rugosidad de la superficie local. Los puntos abarcados por el cilindro de búsqueda se utilizan para calcular la posición promedio de la nube 1 y la nube 2. La distancia entre las posiciones promedio (a lo largo del vector normal) es la distancia M3C2. La geometría del cilindro de búsqueda es definida por el usuario, dado que controla el grado de promediado espacial (controla el radio de búsqueda asociado a cada cilindro, condicionado por el espaciamiento de los puntos y de la complejidad de la superficie), tal como se muestra en la **Figura 11**, donde se representan dos tamaños de diámetros de proyección diferentes. Si no hay puntos de la nube de puntos 2 capturados dentro del cilindro, no se calcula la distancia.

4) **MAPEO GEOTÉCNICO**

4.1) ÁREAS DE ESTUDIO

4.1.1) ESTUDIO FOTOGRAMÉTRICO

En base al desarrollo del servicio de topografía y Geogestión integral de Geosupport en Mina El Soldado (Figura **12**), AngloAmerican, ubicada en la comuna de Nogales, Región de Valparaíso, es de interés analizar sector del rajo correspondiente a la fase 3 de producción (Figura **12**), la que presenta fracturamiento visible y se ha hecho necesario la incorporación de contenedores para evitar el desplazamiento de material que ha sido desprendido de los bancos, a este sistema de fallas lo denominan "Falla Tobas".

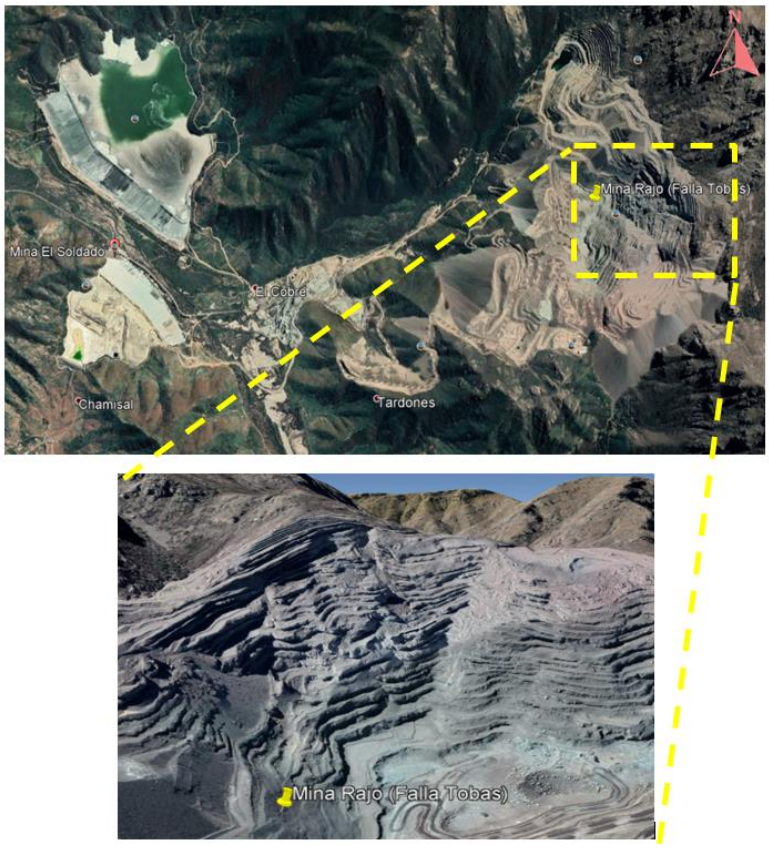


Figura 12, Área de interés para vuelo fotogramétrico.

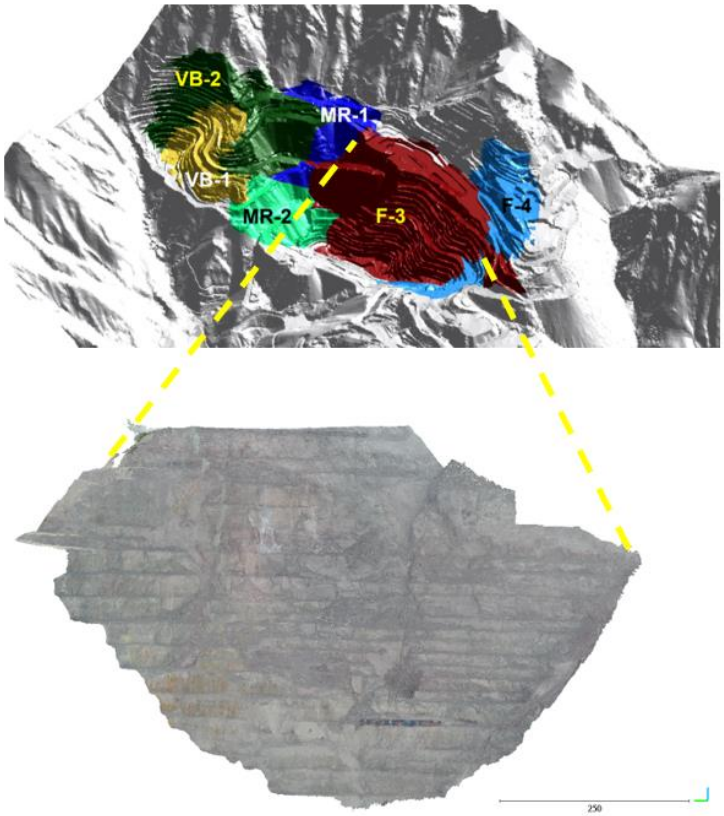


Figura 13, Clasificación por fase del área de interés en Mina El Soldado, correspondiente a la Fase 3 de producción. Se aprecian además los proyectos expansión norte El Soldado (Galaz, 2017).

4.1.2) MONITOREO ESCÁNER LASER

Para esta etapa del proyecto se considera el análisis del muro de un tranque de relaves, a través de monitoreo de desplazamientos que permitan generar alertas y tener un registro histórico que permita su evolución en el tiempo, donde a diario se ejecutan labores de compactación de arenas. Dada la confidencialidad de la empresa con sus clientes no se hará mención del área de estudio considerada.

4.2) SELECCIÓN CAMARA, DRON, ESCÁNER LASER

Tal como fue mencionado en capítulos anteriores, la fotogrametría aérea requiere que la cámara fotográfica sea de una alta resolución para obtener mejores resultados en el proceso fotogramétrico. En base a los requerimientos presentados para generar fotografías de calidad se presentan los equipos a utilizar:

CAMARA RGB

Se utilizó la cámara Zenmuse X4S de la marca DJI **(Figura 14**) cuyas características técnicas son presentadas en la **Tabla 4**.

Figura 14, Cámara RGB Zenmuse X4S

Características del Equipo:

- Sensor CMOS, pixels efectivos de 1”: 20 MP
- Resolución video: 4K 60 FPS
- Lente:
    - Apertura: F / 2.7- F/ 11, 8.8 mm
    - FOV 84°
- Gimbal de 3 ejes

Modelo	Zenmuse X4S
Dimensiones	125 x 100 x 80 mm
Peso	253 g
Cámara	
Sensor	CMOS Píxeles efectivos de 1”: 20 MP
Lente	Apertura: F / 2,8-11; 8,8 mm (equivalente a 35 mm: 24 mm)
FOV	84°
Resolución de fotos	3:2, 5.472 × 3.648 4:3, 4.864 × 3.648 16:9, 5.472 × 3.078
Resolución de video	**H.264** C4K: 4096 × 2160 23,976 / 24/25 / 29,97 / 47,95 / 50 / 59,94p @ 100Mbps 4K: 3840 × 2160 23,976 / 24/25 / 29,97 / 47,95 / 50 / 59,94p @ 100Mbps FHD: 1920 × 1080 23,976 / 24/25 / 29,97p @ 60Mbps 47,95 / 50 / 59,94p @ 80Mbps 119,88p @ 100Mbps **H.265** C4K: 4096 × 2160 23,976 / 24/25 / 29,97p @ 100Mbps 47,95 / 50 / 59,94 p @ 80Mbps FHD: 1920 × 1080 23,976 / 24/25 / 29,97p @ 50Mbps 47,95 / 50 / 59,94p @ 65Mbps 119,88p@100Mbps.
Formato de Foto	DNG, JPEG, DNG + JPEG
Formato de Video	MOV, MP4
Rango ISO	100 – 6.400 (vídeo) 100 – 12.800 (imágenes fijas)
Gimbal	
Rango de vibración angular	±0.01°
Montaje	Desmontable
Rango controlable	Inclinación: +30° a -90°, Pan: ±320°
Rango mecánico	Inclinación: +50° a -140°, Pan: ±330°, Rollo: +90° a -50°
Condiciones ambientales	
Temperatura de funcionamiento	-10° a 40 °C

Tabla 4, Ficha técnica cámara Zenmuse X4S.

DRON

Se utilizo el Dron Matrice 200 de la marca DJI (Figura **15**), cuyas características técnicas son presentadas en la Tabla **5**.

Figura 15, Dron Matrice 200 DJI

Características del Equipo:

- Rango operación: 7 km
- Tiempo de vuelo (máximo): 38 min
- IP43
- Capacidad máxima de carga: 2 kg
- Dimensiones: 716 x 220 x 236 mm
- Peso equipo: 3,8 Kg

Modelo	M200
Peso	3,8 kg
Dimensiones	Plegado: 716 × 220 × 236 mm (largo × ancho × alto) Desplegado: 887 × 880 × 378 mm (largo × ancho × alto)
Distancia diagonal	643 milímetros
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s
Velocidad máxima de descenso	3 m/s
Velocidad máxima	Modo S: 82,8 km / h Modo P: 61,2 km / h Modo A: 82,8 km / h
Altitud máxima de despegue	3000 msnm
Tiempo máximo de vuelo	38 min

Tabla 5, Ficha técnica Dron DJI M200.

A continuación, se presenta como queda instalada la cámara Zenmuse X4S en el dron M200 DJI (Figura 16).

Figura 16, Dron M200 con cámara RGB Zenmuse X4S

ESCÁNER LASER

Se utilizo el escáner laser VZ-2000i de la marca Riegl (Figura **17**), cuyas características técnicas son presentadas en la Tabla **6**.

Figura 17, Escáner laser VZ-2000i, Riegl

Modelo	VZ-2000i				
Peso	9,8 kg				
Dimensiones	206 x 308 mm (ancho x alto)				
Exactitud / Precisión	5 mm / 3 mm				
FOV	100° vertical / 360° horizontal				
Tasa de repetición pulso láser (peak)	50 kHz	100 kHz	300 kHz	600 kHz	1200 kHz
Tasa de medición efectiva máxima (medición/s)	21.000	42.000	125.000	250.000	500.000
Rango de medición máximo	2.500 m	1.850 m	1.100 m	800 m	600 m
Rango mínimo	2 m	1,5 m	1,5 m	1,0 m	1,0 m

Tabla 6, Ficha técnica escáner laser largo alcance VZ-2000i.

4.3) CAPTURA DE LOS DATOS

4.3.1) FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría permite conocer las propiedades geométricas de una superficie en base a información obtenida a partir de varias imágenes con información redundante. Para que dicha superficie pueda estar fielmente reconstruida, debe de aparecer en un número suficiente de imágenes. Es esta información repetida, la que permite extraer su estructura.

Esta información "extra" se obtiene a través del solapamiento entre imágenes consecutivas (overlap). Para ello se planifica la misión de vuelo de forma que cada imagen contenga elementos que también aparecen en la imagen anterior, posterior y las vecinas en los laterales. El porcentaje de solape suele oscilar entre el 60% y el 90%, y habitualmente viene calculado por el software de planificación de vuelo. Estos programas se encargan de calcular secuencias de disparos a partir de la posición esperada del Dron, su altura y el solape deseado.

En la ***Figura 18*** se presenta una "sección" de las imágenes obtenidas para el estudio fotogramétrico. Corresponden a 170 fotografías obtenidas el 27-10-2020 de los taludes del rajo de mina "El Soldado" que abarcan en su totalidad la falla "Tobas".

Figura 18, Set fotográfico rajo el soldado obtenido mediante Zenmuse X4S montado en M200

A continuación, se presenta una secuencia de actividades del proceso fotogramétrico realizadas en software Agisoft referentes a la carga del set fotográfico (Figura **19**) y la generación de la nube de puntos (Figura **20**). Dicha nube de puntos está conformada por 44.259.197 de puntos.

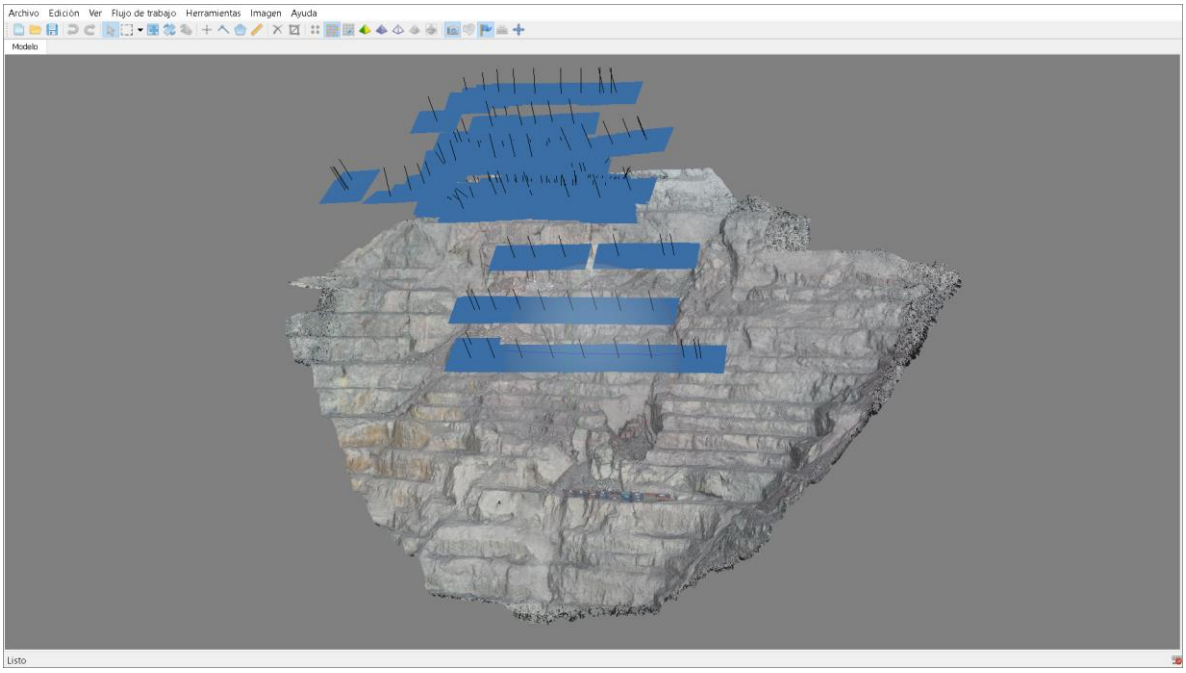


Figura 19, Ubicación espacial del set fotográfico

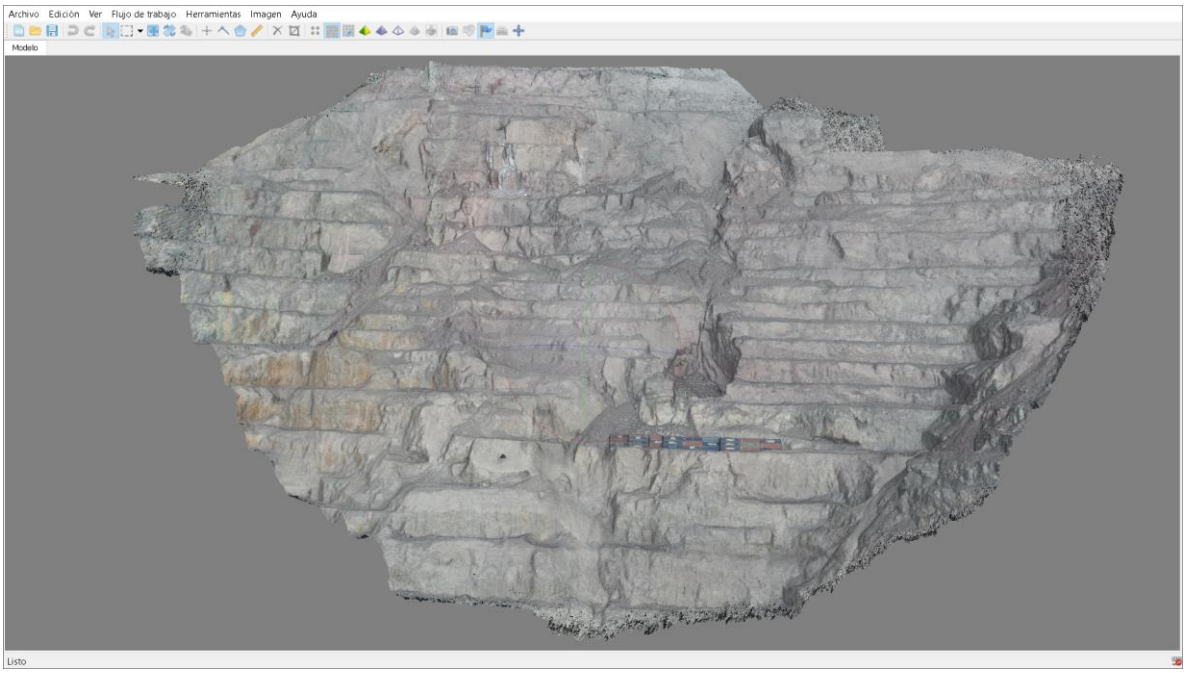


Figura 20, Nube de puntos densa resultante

La nube de puntos obtenida en software Agisoft, es exportada como archivo de texto (.TXT) al software CloudCompare, plataforma donde se permitirá reducir la cantidad de puntos considerados a través de la herramienta "cloud sub sampling [1]".

En la ***Figura 21*** se muestra la nube de puntos ya cargada en software CloudCompare.

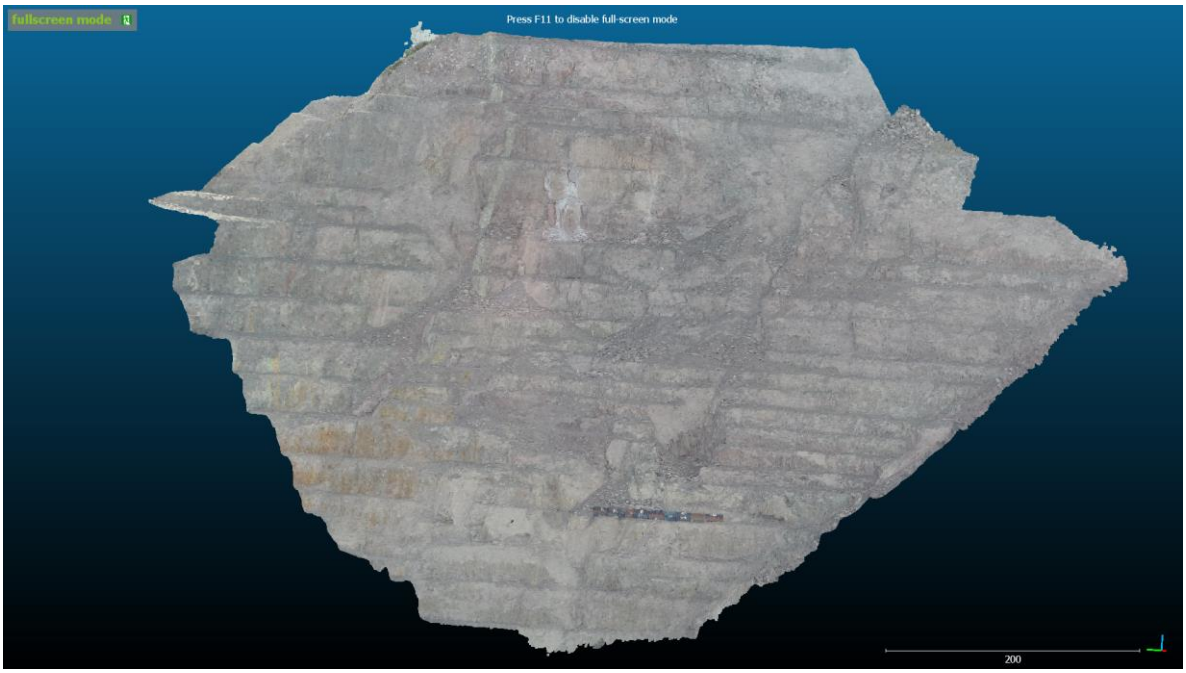


Figura 21, Nube de puntos en CloudCompare (44.259.197 puntos)

Se define realizar una submuestra de la nube de puntos densa mediante el método "espacial", definiendo como criterio que solo se consideren los puntos que se encuentren a un mínimo de 20 cm entre sí.

Lo anterior permitirá que todo el modelo presente la misma densidad de puntos, asegurando que el posterior estudio de vectores normales y densidad de discontinuidad sea correcto. En la Figura **22** se presenta el resultado de la submuestra, la nube de puntos se redujo a 6.408.005 puntos. En la que, si bien no es posible apreciar a simple vista diferencias, al realizar el proceso de submuestra "espacial" permite "homogenizar" toda la nube de puntos a una misma característica (20 cm entre cada punto), reduciendo la cantidad de puntos con la que se trabaja. De igual manera es posible ajustar el "tamaño" de cada punto para no perder información "visualmente".

[1] Herramienta del software CloudCompare que permite generar una submuestra de la totalidad de la nube de puntos, que busca disminuir el número de puntos. Existen 3 métodos de submuestreo: aleatorio, espacial y basa en octárbol.

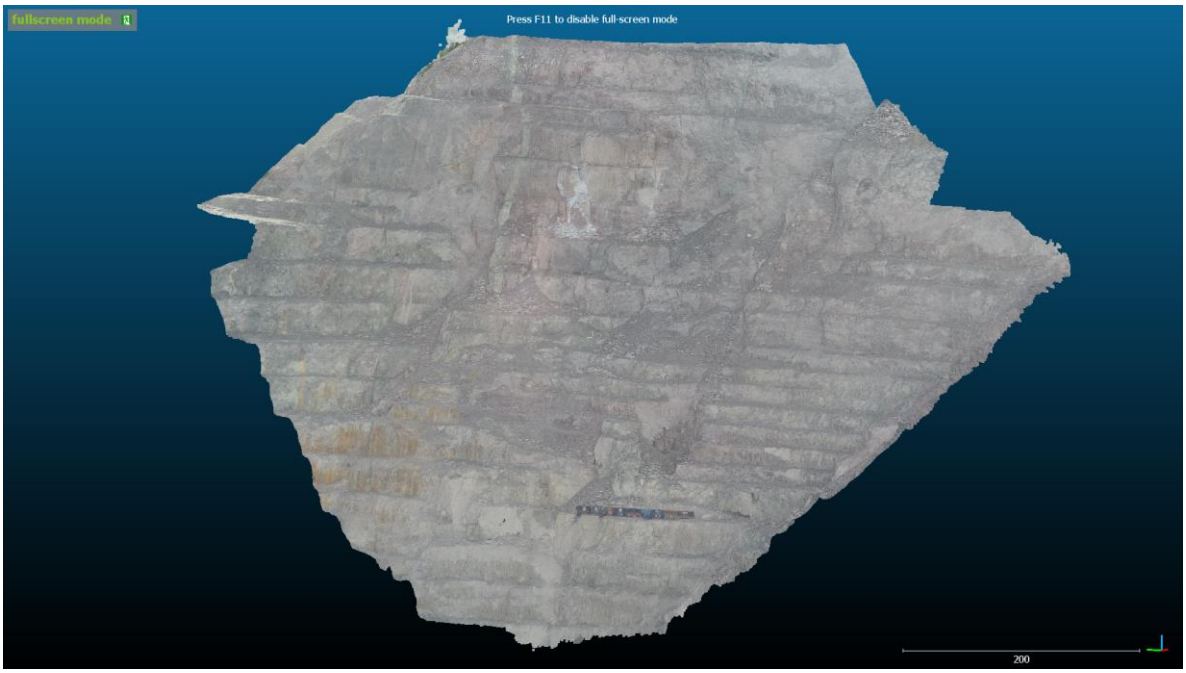


Figura 22, Submuestra de la nube de puntos resultante de espaciado minimo de 20 cm (6.408.005 puntos)

4.3.2) ESCANÉR LÁSER

La incorporación de los datos de alta precisión obtenida desde el escáner laser para el registro del progreso de la excavación y la construcción es relativamente reciente (Hashash et al., 2008). El escaneo láser utiliza el llamado LIDAR (detección de luz y rango), similar al RADAR (detección de radio y rango), pero usa luz para medir la distancia. El escáner láser tiene un diodo emisor que puede generar una fuente de luz de una frecuencia específica. El espejo guía el rayo láser hacia el objetivo y la superficie del objetivo refleja el rayo láser. Usando el principio de tiempo del pulso de vuelo, la distancia se puede determinar por el tiempo de viaje (precisión milimétrica). Los resultados del escaneo proporcionan una nube de puntos, que se procesa para obtener un modelo 3D de alta resolución (HDS).

El sistema implementado para el estudio del muro del tranque, consta de 3 escáner laser ubicados estratégicamente alrededor del muro al interior de casetas de monitoreo (Figura 23), los cuales están programados para realizar escaneos a horas definidas (02:00 AM, 08:00 AM, 14:00 PM, 20:00 PM). Cada escáner laser genera una nube de puntos asociada a una hora especifica (es decir, 3 nubes de puntos en total), estas 3 nubes de puntos son superpuestas mediante CloudCompare, generando una única nube de puntos resultante. Posterior a ello y con las nubes resultantes de las diferentes capturas se estudia el desplazamiento de los puntos mediante el complemento M3C2 para emisión de alertas y llevar registro histórico de los desplazamientos.

Figura 23, Casetas de monitoreo. Cumplen la función de proteger el escáner laser, además de su fuente de energía (generador petróleo)

El proceso consiste en cargar dos nubes de puntos en software Cloudcompare ***(Figura 24)*** luego mediante complemento M3C2 (***Figura 25***) se obtiene un mapa resultante donde se detalla la distancia entre puntos de las nubes de puntos.

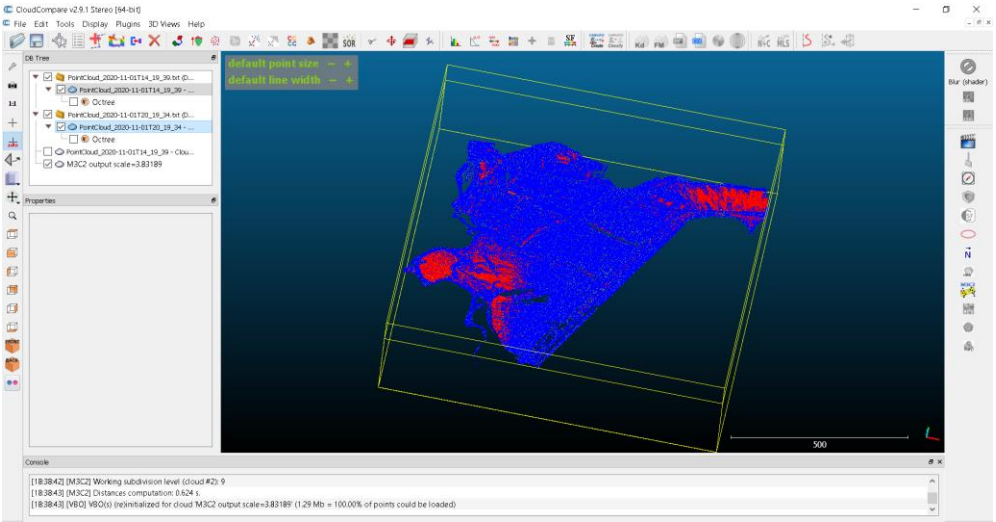


Figura 24, Interfaz de Cloudcompare donde se han cargado la nube de puntos de 08:00 AM y la de 14:00 PM. Para aplicarse complemento M3C2

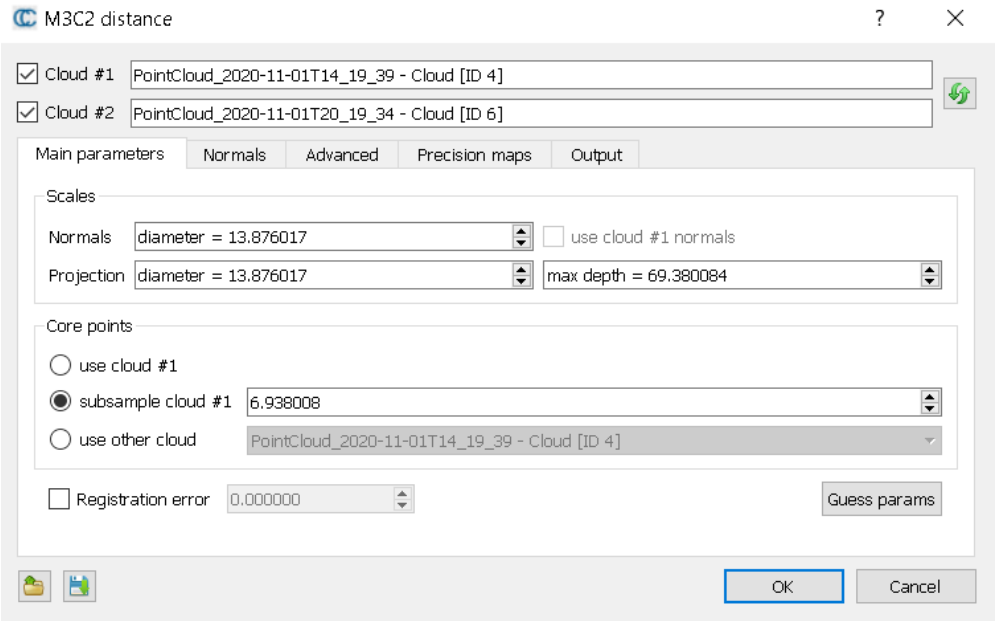


Figura 25, Complemento M3C2 con las nubes de puntos cargadas

4.4) PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

4.4.1) DISCONTINUITY SET EXTRACTOR (DSE)

El Discontinuity Set Extractor (DSE) corresponde a un programa de software cuyo código fue desarrollado en MATLAB, programado por PhD Adrián Riquelme de la Universidad de Alicante, España.

Su objetivo es extraer conjuntos de discontinuidades de un macizo rocoso. Los datos de entrada son una nube de puntos 3D, que se puede adquirir mediante un escáner láser 3D (LiDAR o TLS), técnicas de fotogrametría digital (como SfM) o datos sintéticos. La metodología (Riquelme et al., 2014) propone identificar semiautomáticamente los miembros de puntos de una nube de puntos 3D no organizada que están dispuestos en el espacio 3D por planos.

El proceso consiste en importar la nube de puntos (la submuestra) obtenida desde CloudCompare en formato ASCII, ingresando las coordenadas X, Y, Z de cada punto. Con ello se procede a seguir los pasos señalados en la Figura **26**.

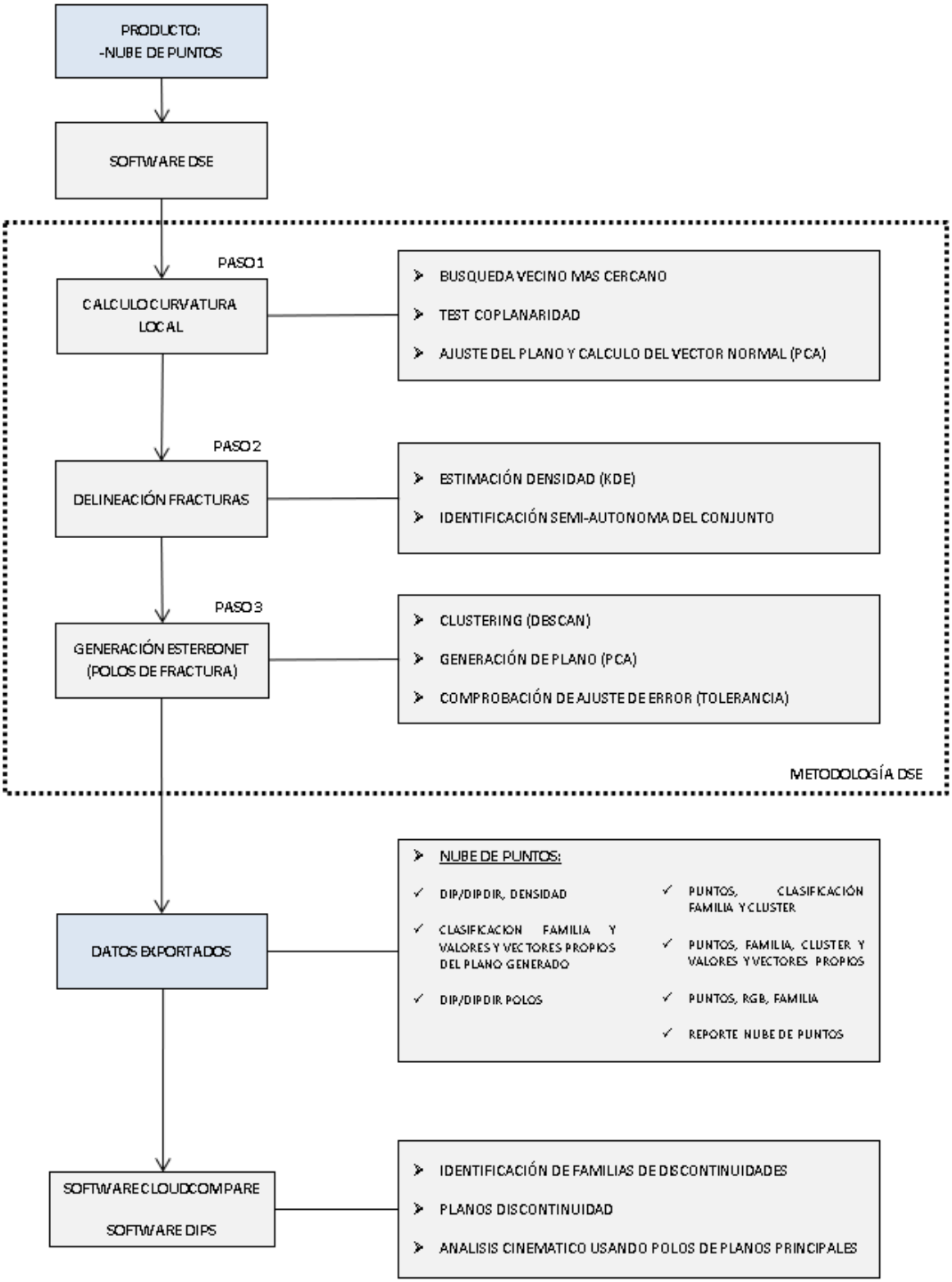


Figura 26, Proceso general de trabajo mediante software DSE

4.4.2) MULTISCALE MODEL-TO-MODEL CLOUD COMPARISON (M3C2)

El algoritmo Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) corresponde a un complemento del software Cloudcompare posee tres características fundamentales:

1. Opera directamente sobre nubes de puntos sin mallas ni cuadrículas.
2. Calcula la distancia local entre dos nubes de puntos a lo largo de la dirección normal de la superficie que rastrea las variaciones 3D en la orientación de la superficie.
3. Estima para cada medición de distancia un intervalo de confianza en función de la rugosidad de la nube de puntos y el error de registro.

El proceso consiste en importar la nube de puntos obtenida desde los tres escáneres laser en horario específicos 08:00 AM; 12:00 PM; 16:00 PM y 20:00 PM, luego mediante el complemento del programa (M3C2), estudiar los desplazamientos que pudo haber experimentado el muro del tranque. Con dicha información emitir alertas y llegar un registro histórico del comportamiento de dicho muro. En la Figura **27** se presenta la secuencia de superposición de las nubes de puntos para lectura de una hora especifica (nube de puntos independientes obtenidas desde cada escáner laser).

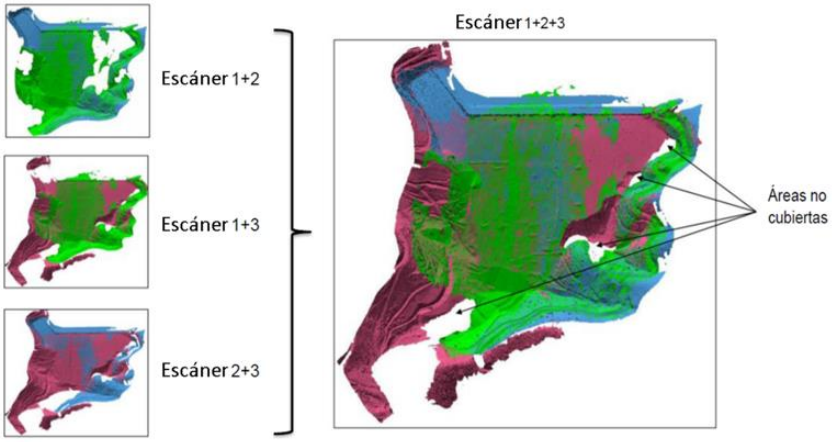


Figura 27, Esquema representativo de la superposición de las tres nubes de puntos (independientes) obtenidas a partir de los tres escáner laser. Nube de puntos resultante de dicha superposición mediante Cloudcompare.

El proceso consiste en importar las dos nubes de puntos (resultantes de la superposición de los 3 escáneres) asociada a una hora en específico, pero de días consecutivos, desde CloudCompare en formato ASCII, ingresando las coordenadas X, Y, Z de cada punto. Con ello se procede a seguir los pasos señalados en la Figura **28**.

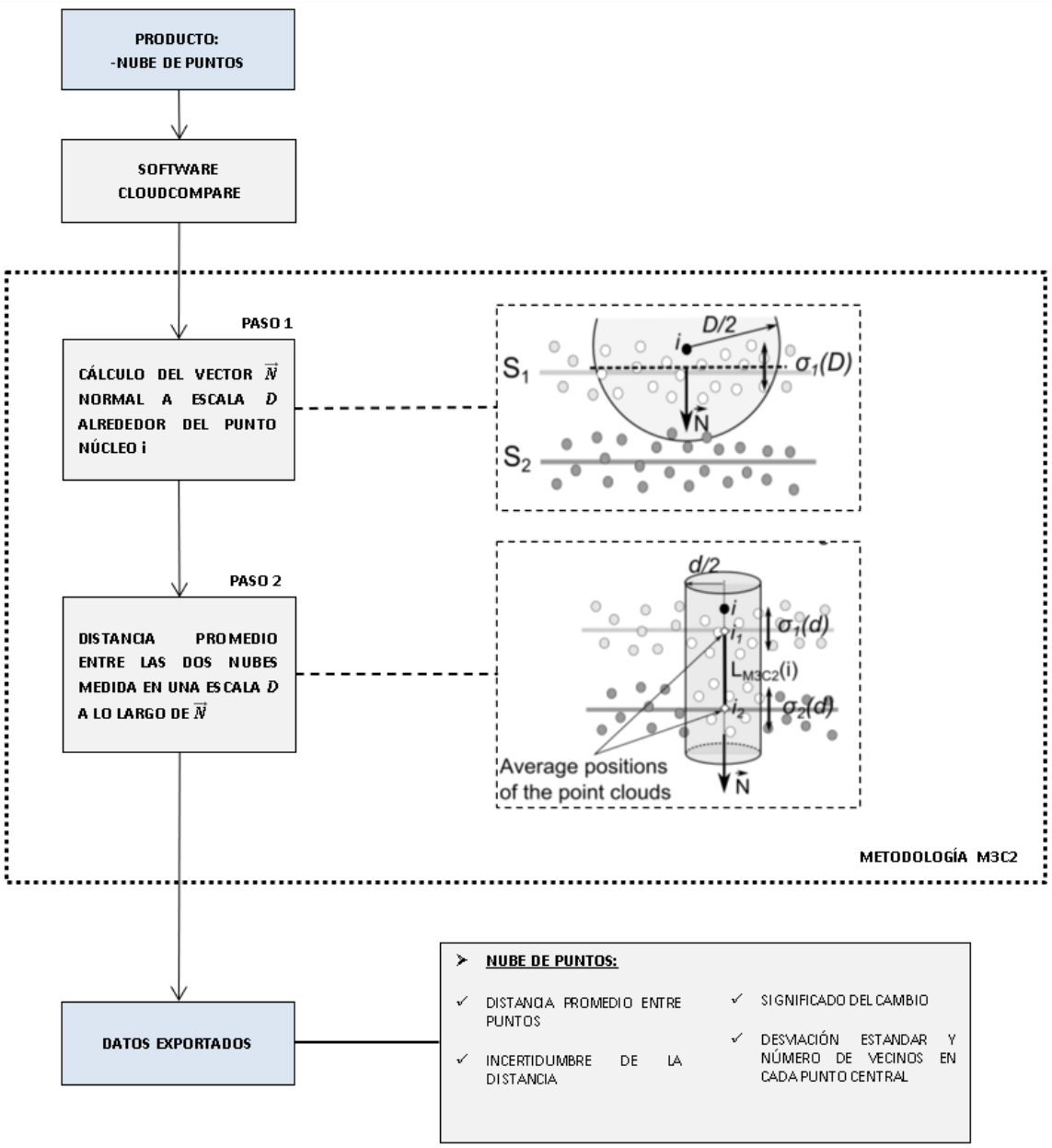


Figura 28, Proceso general de trabajo mediante complemento M3C2 de Cloudcompare

5) ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1) ANÁLISIS FOTOGRAMETRICO

5.1.1) CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE POLOS

DSE desarrolla la función de densidad de polos, representando los polos principales asociados a cada familia de discontinuidades. Durante el análisis el método detecta tres sets de discontinuidades principales (***Figura 29***). En esta figura se observa que a pesar de que el J_1 es el set mas visible, existe otros 2 set de discontinuidades representado (J_2y J_3). Desde el análisis visual es posible concluir que la orientación del set J_1 representa exitosamente el plano de estratificación de acuerdo con la ***Figura 30*** y ***Figura 31.***

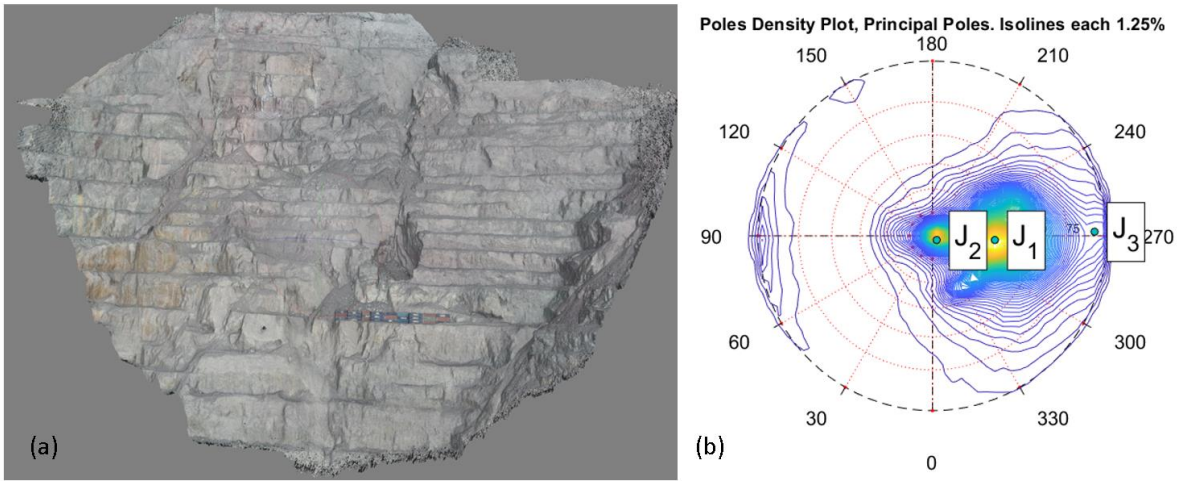


Figura 29, (a) Nube de puntos. (b) Grafico de densidad de vectores normales de los diferentes planos. Se identifican 3 polos principales: J1 (44/273), J2 (3/314), J3 (85/268). isolíneas son graficadas cada 1,25%

A partir de la Figura **29**, se visualiza que existen 3 familias de discontinuidades bien definidas, por lo que se procede a representar su ubicación espacial mediante los 3 polos principales (
Tabla **7**).

Polo Principal	Dip (°)	DipDir (°)	Clasificación	Orientación
J1	44	273	Familia principal	Intermedio
J2	4	226	Familia secundaria	Sub horizontal
J3	86	269	Familia secundaria	Sub vertical

Tabla 7, Polos principales resultado de la función densidad de polos. (Cono: 30°, Total: 99,9%)

5.1.2) IDENTIFICACIÓN VECTORES NORMALES

Software DSE permite representar cada normal obtenida mediante una proyección estereográfica, asignándole un color especifico, tal como se observa en la ***Figura 30***.

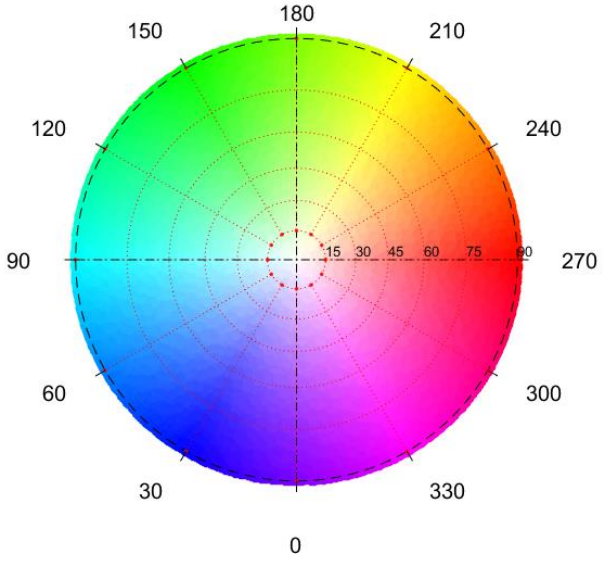


Figura 30, Proyección estereográfica de cada normal con un color asignado

En la ***Figura 31***, corresponde a la identificación de cada vector normal de acuerdo con la clasificación realizada en la proyección estereográfica, es posible identificar las tres familias de discontinuidades obtenida desde el análisis de densidad de polos: J1 (color rojo), J2 (color amarillo) y J3 (color celeste).

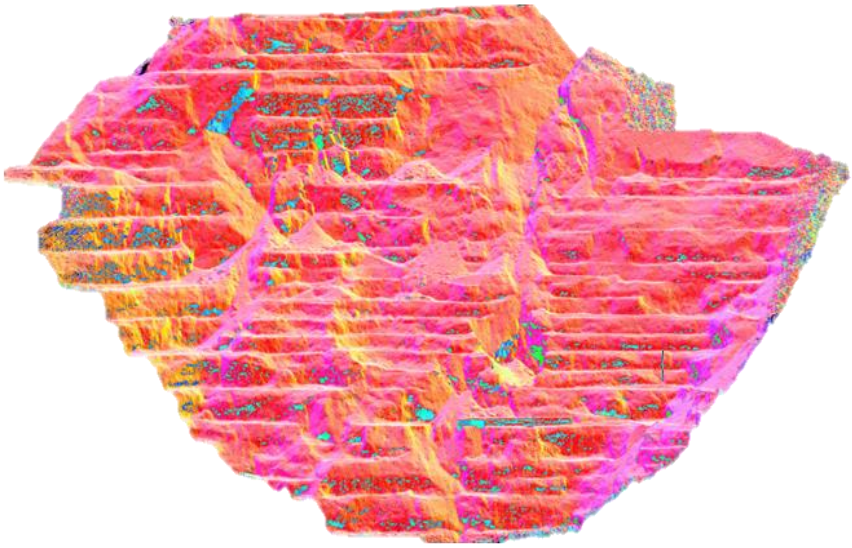


Figura 31, Representación vectores normales en la nube de puntos de acuerdo con colores de proyección estereográfica

5.1.3) CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

El software DSE permite clasificar la nube de puntos a través de análisis de clúster, mediante el algoritmo "Density-Based Scan Algorithm with Noise" (DBSCAN).

Para ello se debe definir e ingresar los siguientes parámetros: (a) ε, corresponde a la máxima distancia entre dos puntos para ser considerados como vecinos; (b) Min_puntos, corresponde al número mínimo de vecinos de puntos de q para considerar a q como un punto central. Este algoritmo asume la densidad como homogénea dentro de la nube de puntos y en función de un cono de apertura de 30° asigna una familia a cada punto de la nube de puntos, se identifican las tres familias ya definidas y su disposición espacial (Figura **32**).

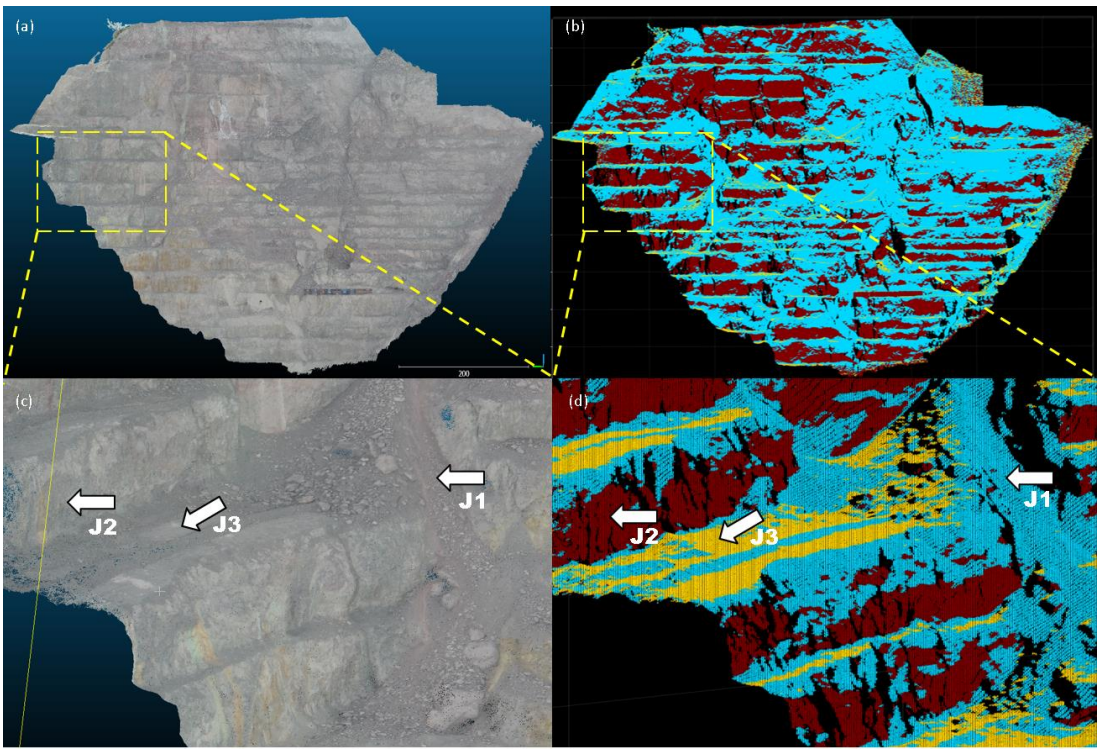


Figura 32, (a) y (c) Representan nube de puntos y una sección de interés, respectivamente. (b) y (c) Representan la asignación de una familia de discontinuidad a cada punto (familias J1, J2 y J3) y una sección de interés, respectivamente (mediante software DSE)

En la Figura 33 es posible identificar las tres familias ya definidas y su disposición espacial, asignación hecha en base a la metodología DSE.

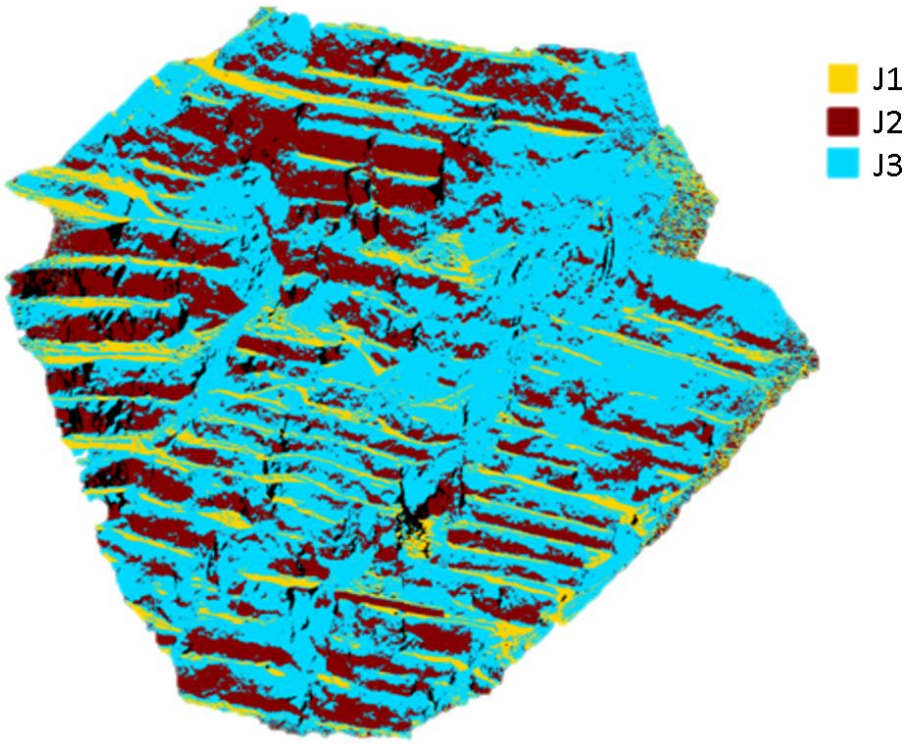


Figura 33, Representan la asignación de una familia de discontinuidad a cada punto (familias J1, J2 y J3), mediante software DSE. Los puntos que no están asociados a una familia de discontinuidad no son representados

En la ***Tabla 8*** se presenta los parámetros de la ecuación del plano de cada clúster, los cuales de acuerdo con los parámetros señalados en el capítulo de Marco Teórico son clasificados dentro de una familia de discontinuidad.

Familia de Discontinuidad	Clúster	N° Puntos	Parámetros para ecuación de clúster: $Ax + By + Cz + D = 0$ (*Ecuación 1*)			
			A	B	C	D
J1	1	181 127	-0,6952	0,0414	0,7177	-54482,9879
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	52	102	-0,6952	0,0414	0,7177	-54482,9879
J2	1	5 870	-0,0477	-0,0468	0,9978	312570,6338
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	71	108	-0,0477	-0,0468	0,9978	312596,3094
J3	1	8 203	-0,9994	-0,024	0,024	455982,8649
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	111	105	-0,9994	-0,024	0,024	455636,7875

Tabla 8, Identificación de la ecuación de clúster desde el macizo rocoso. Identificando la cantidad total de clúster asociado a cada Familia de Discontinuidad.

5.1.3.1) DIAGRAMA DE POLOS

Se ingresa la información de cada polo obtenido desde las proyecciones estereográficas mediante el software DIPS, se considera un universo de 10.000 vectores de polos para asegurar la representatividad de las discontinuidades.

A continuación, en la Figura **34** se representa su distribución espacial, además se representa los polos principales asociados a las 3 familias de discontinuidades identificadas.

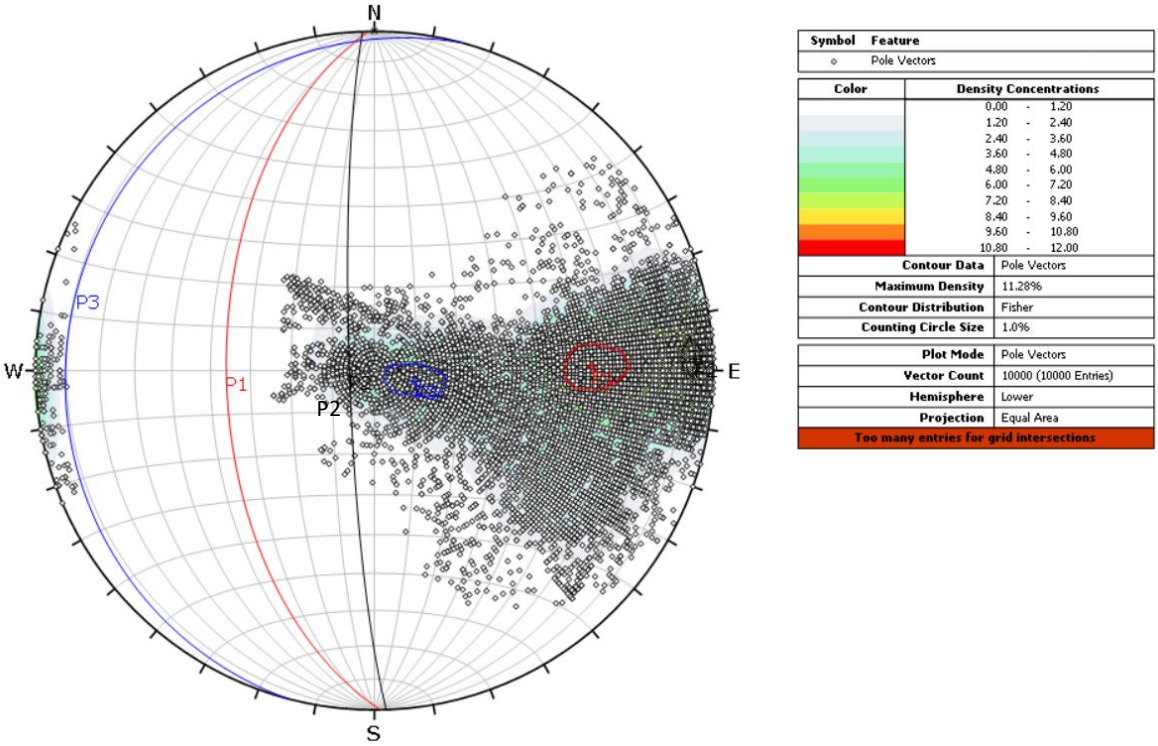


Figura 34, Representación espacial de los 10.000 vectores de los polos. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

Con la disposición espacial de los vectores de cada polo, se procede a realizar un análisis de concentración de polos, identificándose claramente la presencia de las 3 familias de discontinuidades antes señaladas.

Dada la Figura **35**, se corrobora que el resultado obtenido mediante software DSE es coherente ya que identifica las mismas familias, sin embargo, dado que el espacio muestral solo es de 10.000 vectores de polo se visualiza que la familia principal es la P1, seguida de la P2 y finalmente la P3. Para el desarrollo del análisis cinemático se considerará esta distribución.

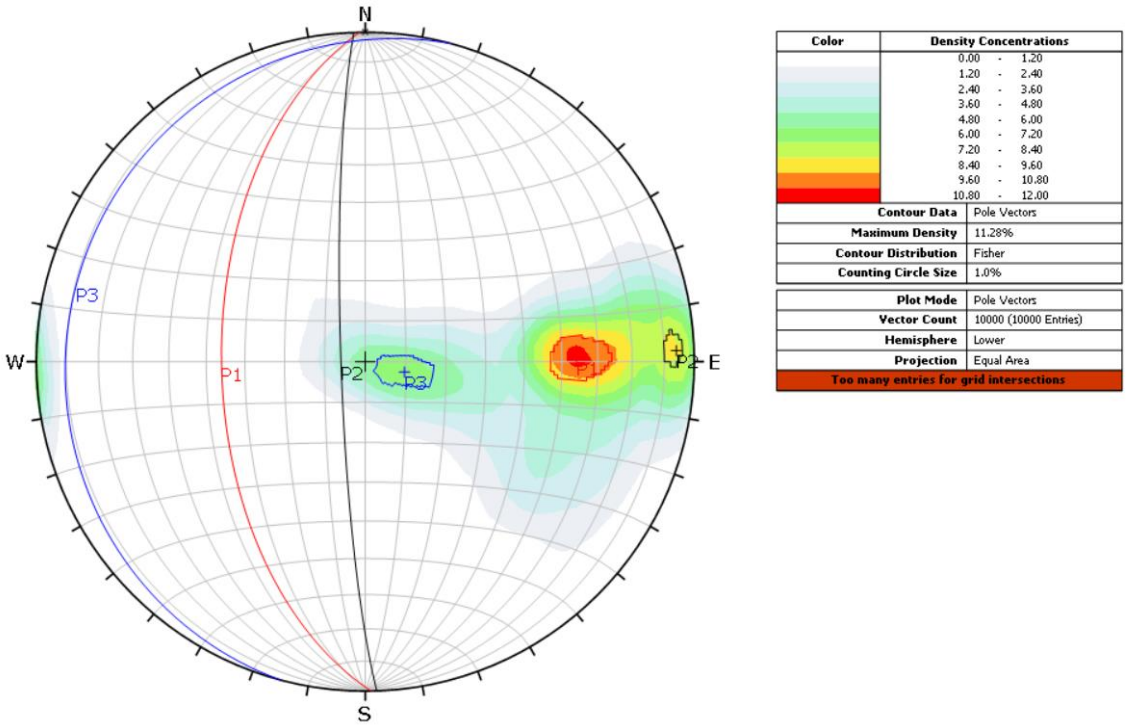
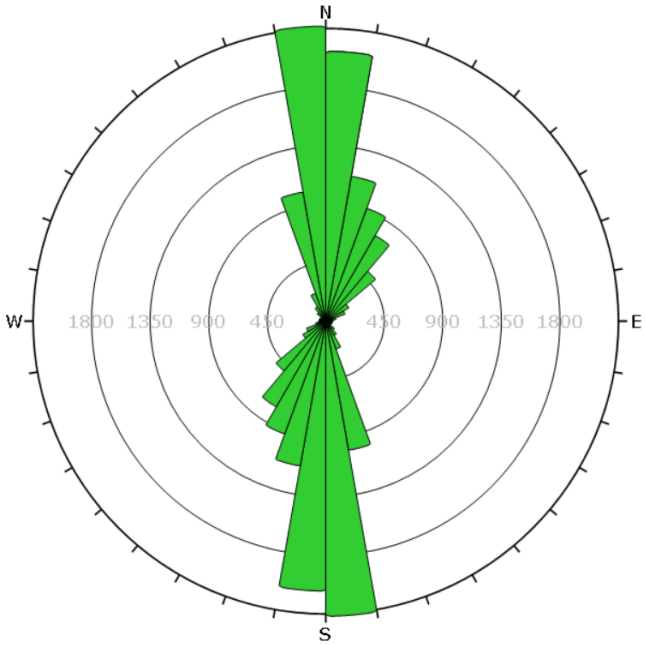


Figura 35, Función densidad en base 10.000 vectores de polos. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

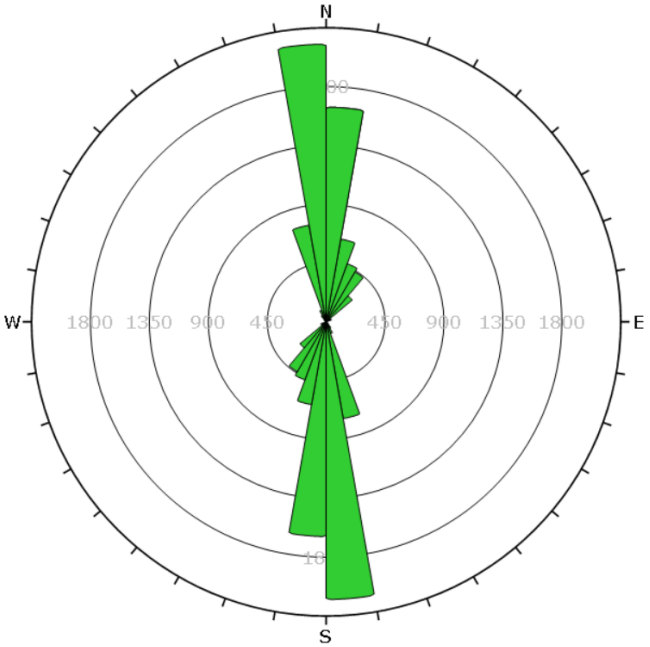
Identificadas las 3 familias de discontinuidades se procede a analizar los planos de falla o diaclasas mediante un histograma de forma redonda, que permita visualizar las direcciones de los rumbos.

En las ***Figura 36*** y ***Figura 37*** se presentan los diagramas de roseta con ángulo mínimo de ploteo de 0° y 45° respectivamente. En ambas es posible identificar claramente la dirección del rumbo de las 3 familias se encuentra en dirección Norte-Sur.



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	2250 planes per arc
Planes Plotted	10000
Minimum Angle To Plot	0.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°
Too many entries for grid intersections	

Figura 36, Diagrama roseta con ángulo mínimo de ploteo de 0°



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	2250 planes per arc
Planes Plotted	6549
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°
Too many entries for grid intersections	

Figura 37, Diagrama roseta con ángulo mínimo de ploteo de 45°

5.1.4) ANÁLISIS CINEMÁTICO Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

El diseño minero de la operación de la Fase 3 de Mina El Soldado, considera los siguientes parámetros:

Diseño Mina	Fase 3
Ángulo inter-rampa	55°
Ángulo cara banco	67°
Ancho Rampa	30 m
Ancho Berma	10 m
Altura banco	15/30 m

Tabla 9, Parámetros de diseño minero para Fase 3, Mina El Soldado.

El diseño del rajo considera altura variable del banco acorde al sector que se está explotando, de acuerdo con la Figura **38**.

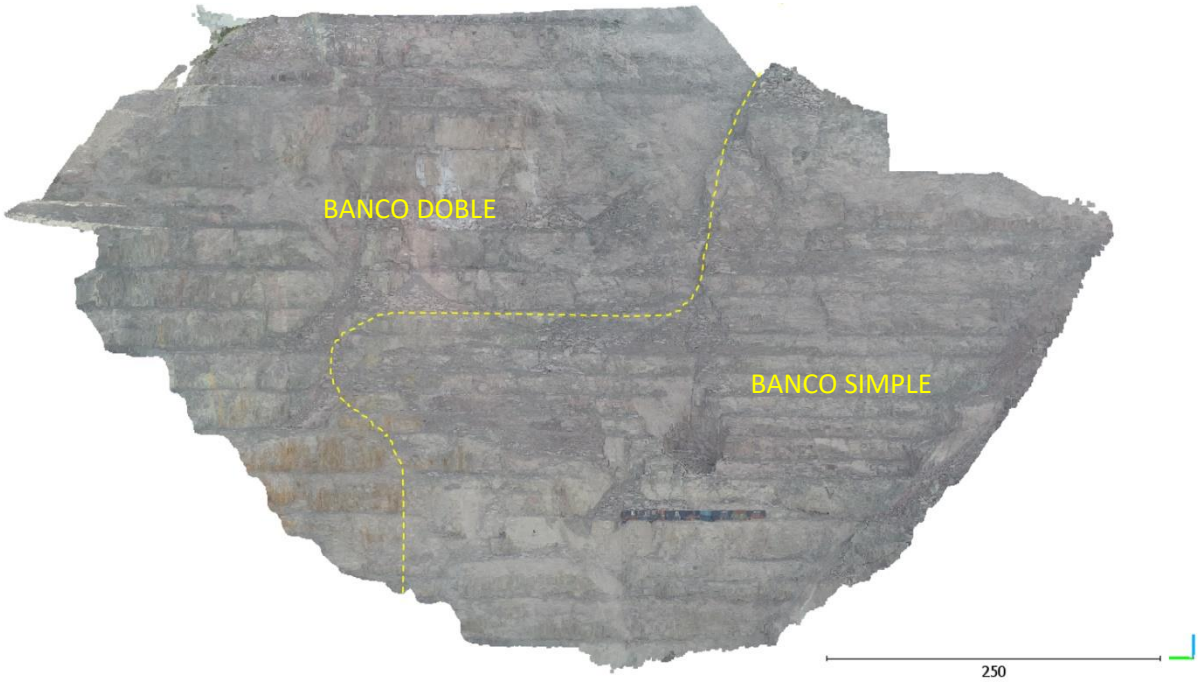


Figura 38, Identificación de la sectorización de altura de los bancos.

Para el análisis cinemático se trabajará a escala de banco (simple), utilizando la herramienta del software DIPS "Kinematic Analysis", donde se ingresan los parámetros asociados al talud a estudiar, de acuerdo con el análisis en terreno y corroborados mediante el modelo generado a partir de la nube de puntos del vuelo fotogramétrico se tiene los siguientes parámetros de diseño (Tabla **10**).

Parámetro	Valor
Dip/DipDir Banco	67°/270°
Angulo de fricción[2]	31°
Limite lateral	20°

Tabla 10, Parámetros banco para análisis cinemático.

Se procede a generar el análisis cinemático para los taludes correspondiente al rajo de minera "El Soldado", buscando identificar potenciales de modos de falla de deslizamiento plano, deslizamiento de cuña, caída por flexión y caída directa.

Se procede entonces a analizar cada una de las posibles fallas que puede experimentar los taludes estudiados, la Figura **39** representa el análisis asociado al estudio de falla planar.

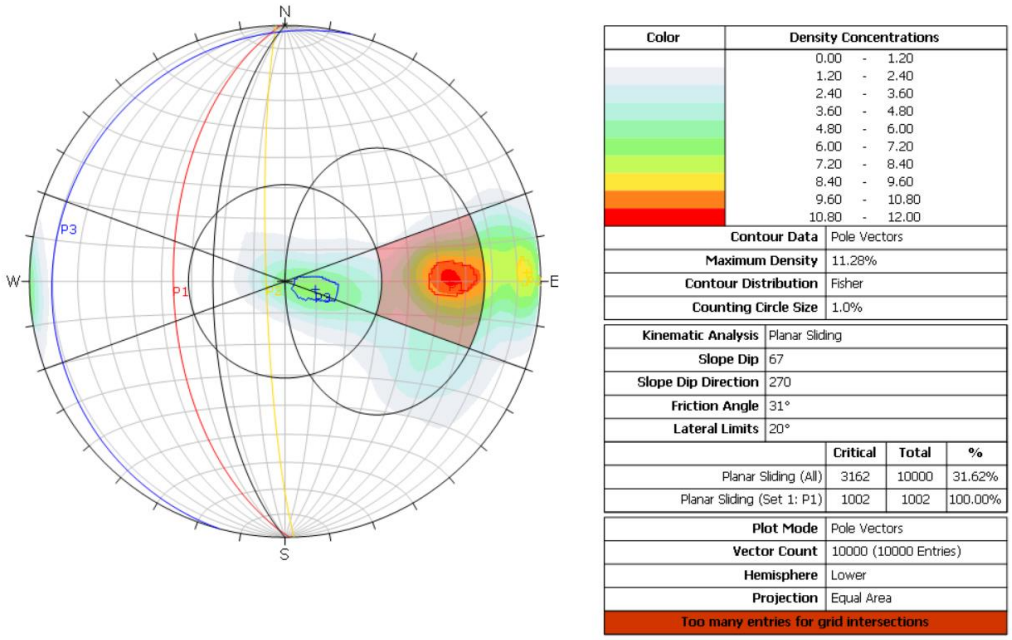
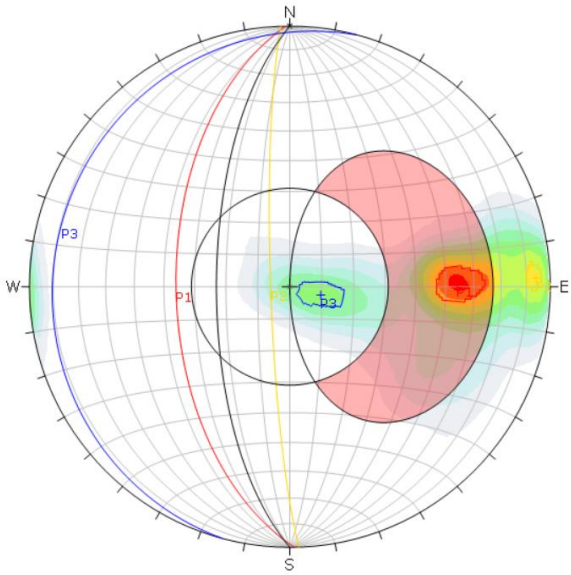


Figura 39, Análisis cinemático falla planar. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

[2] Angulo de Fricción: Corresponde a la resistencia natural a lo largo de la discontinuidad intrínseca a la roca que se tiene.

En la Figura **40** se analiza la probabilidad de ocurrencia del mismo tipo de falla (planar) pero sin la restricción de los limites laterales.



Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.20
	1.20 - 2.40
	2.40 - 3.60
	3.60 - 4.80
	4.80 - 6.00
	6.00 - 7.20
	7.20 - 8.40
	8.40 - 9.60
	9.60 - 10.80
	10.80 - 12.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	11.28%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	67
Slope Dip Direction	270
Friction Angle	31°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	4281	10000	42.81%
Planar Sliding (Set 1: P1)	1002	1002	100.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	10000 (10000 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Too many entries for grid intersections

Figura 40, Análisis cinemático falla planar sin límites. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

En la Figura **41**, se analiza la probabilidad de ocurrencia del mismo tipo de falla por cuña.

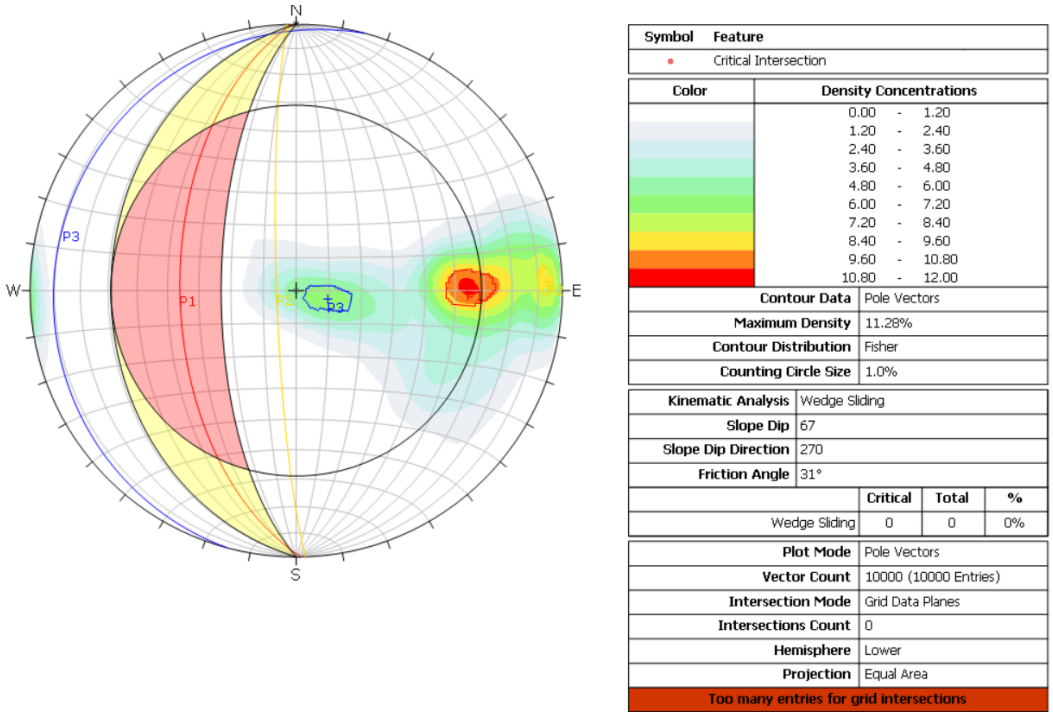


Figura 41, Análisis cinemático falla por cuña. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

En la Figura **42** se analiza la probabilidad de ocurrencia de la falla tipo Flexural.

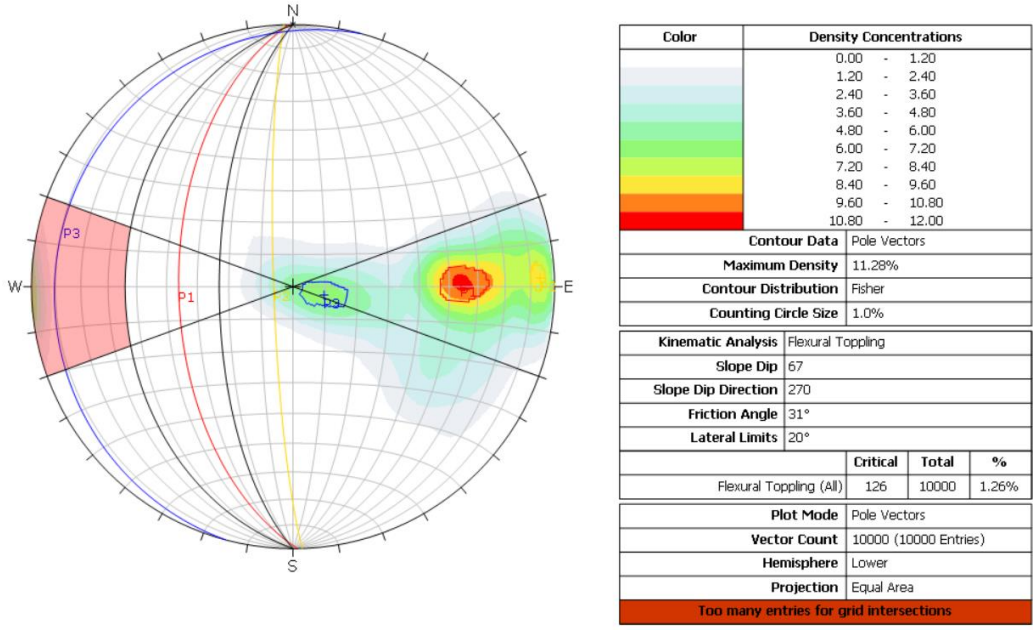
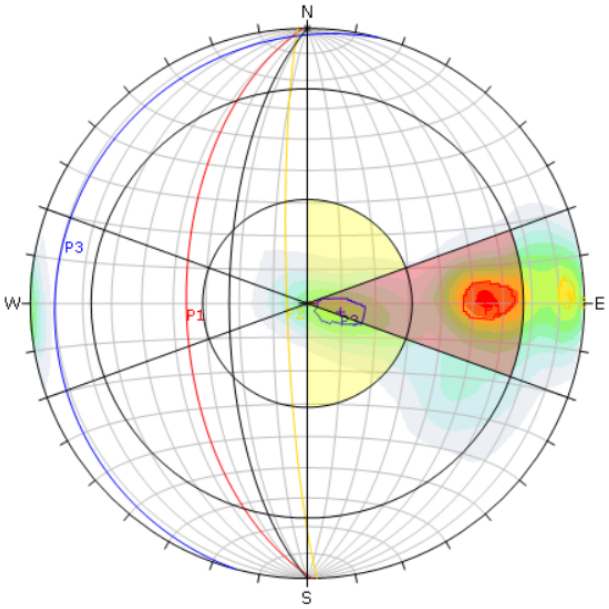


Figura 42, Análisis cinemático falla Flexural. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

En la Figura **43** se analiza la probabilidad de ocurrencia de la falla tipo toppling directo.



Symbol	Feature
▪	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.20
	1.20 - 2.40
	2.40 - 3.60
	3.60 - 4.80
	4.80 - 6.00
	6.00 - 7.20
	7.20 - 8.40
	8.40 - 9.60
	9.60 - 10.80
	10.80 - 12.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	11.28%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Direct Toppling
Slope Dip	67
Slope Dip Direction	270
Friction Angle	31°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	0	0	0%
Oblique Toppling (Intersection)	0	0	0%
Base Plane (All)	5088	10000	50.88%
Base Plane (Set 1: P1)	1002	1002	100.00%
Base Plane (Set 3: P3)	462	462	100.00%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	10000 (10000 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	0
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Too many entries for grid intersections

Figura 43, Análisis cinemático toppling directo. Proyección estereográfica representada en hemisferio inferior y área equivalente.

El análisis cinemático debe considerar dos etapas: la primera asociada al análisis probabilístico mediante software DIPS y una segunda donde se estudia el afloramiento de las discontinuidades, sea éste a escala banco o inter-rampa.

El presente proyecto considera el estudio a escala de banco. Dado que las familias de discontinuidades son prácticamente las mismas de forma global como a escala banco, se considerará todos los datos, asociados a las 3 familias de discontinuidades identificadas J1 (44/273), J2 (3/314), J3 (85/268).

Al conocer los parámetros de diseño de los bancos (geometría), se puede verificar si la discontinuidad sale en la berma, evaluando el área potencialmente inestable, correspondiente a él volumen máximo por metro lineal (Figura **44**). Presentándose en la Tabla **11** el resumen de los resultados para el análisis cinemático de los taludes tanto del análisis probabilístico como el estudio del afloramiento de discontinuidades a escala de banco.

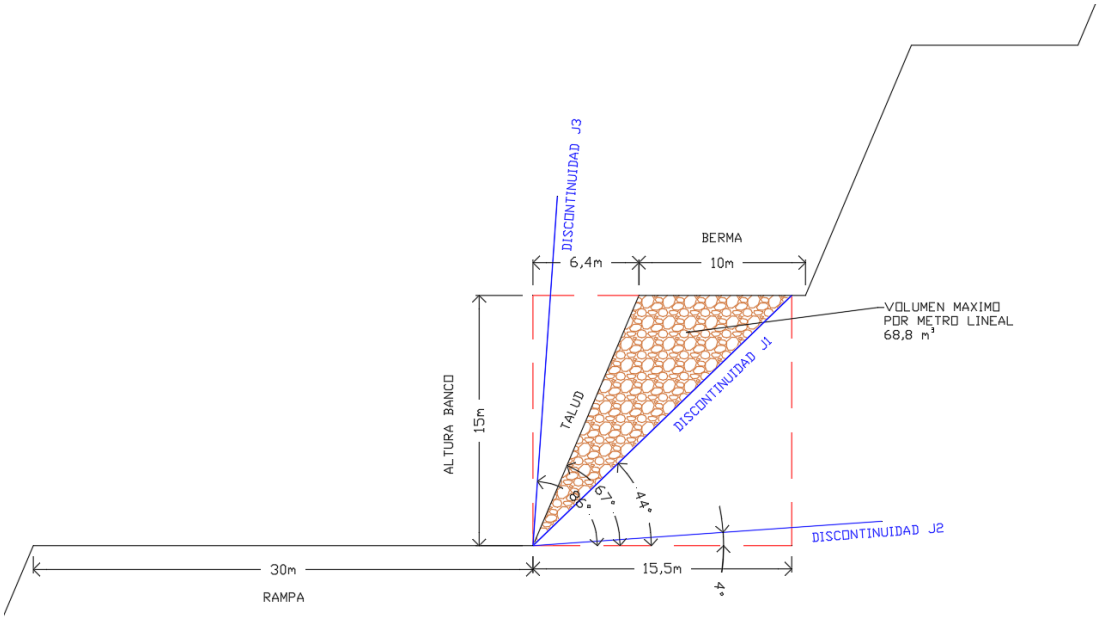


Figura 44, Estudio de afloramiento discontinuidad J1, J2 y J3 a escala banco.

Tipo de Falla	Porcentaje Discontinuidades por		Volumen Máximo por Metro Lineal
	Familia	Total Discontinuidades	
Falla Planar	J1: 100%	31,6%	68,8 m^3
Falla Planar (sin límites)	J1: 100%	42,8%	68,8 m^3
Falla Cuña	0%	0%	-
Falla Flexural	-	1,3%	-
Falla Toppling Directo	J1: 100% J3: 100%	50,9%	-

Tabla 11, Resumen del análisis cinemático de los taludes, mediante análisis probabilístico y estudio de afloramiento de las discontinuidades estudiadas.

5.1.5) CALCULO DE ESPACIAMIENTO ENTRE DISCONTINUIDADES

Dentro del software DSE existe la opción del cálculo del espaciado normal (distancia) entre planos de discontinuidad medidos a lo largo de una línea de exploración ortogonal, en esta se incluye la opción de discontinuidades persistentes y no persistentes, considerando las relaciones tridimensionales entre clúster, calculando el espaciado midiendo la distancia ortogonal entre un clúster dado y su clúster vecino más cercano.

Si bien no existe limitación del área de estudio, se evaluará una sección de área de 30x30m, de Mina El Soldado correspondiente al estudio de un banco doble (Figura **45**).

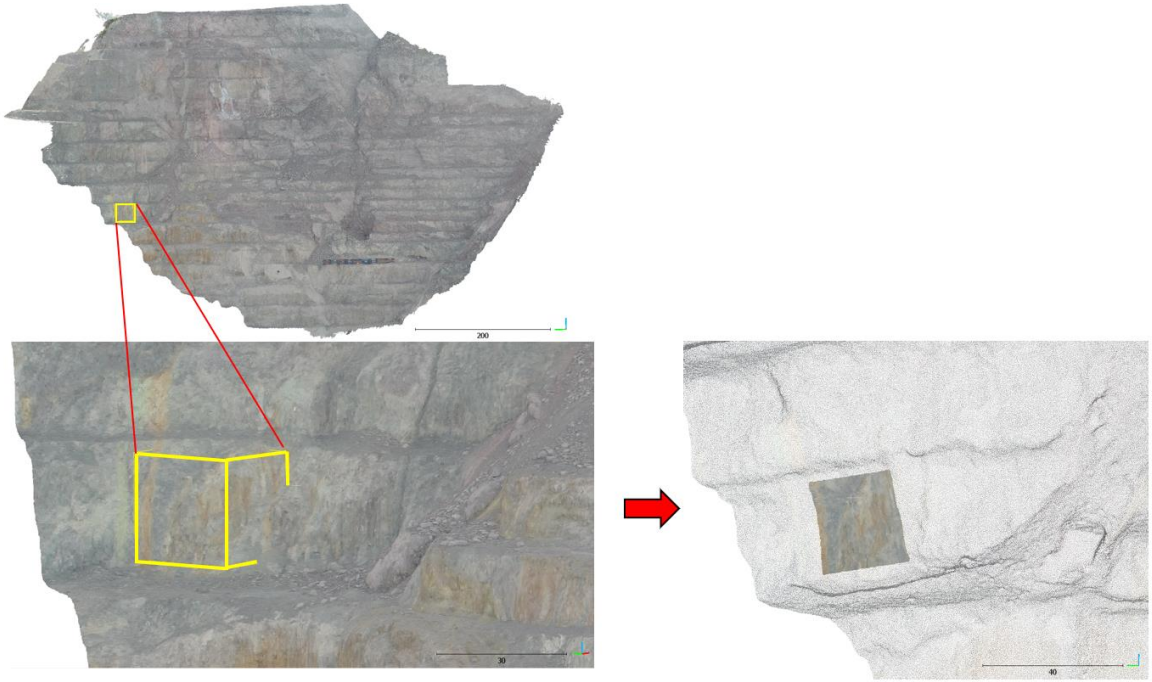


Figura 45, Sección de área seleccionada para estudio (30x30m) de espaciamiento y persistencia de discontinuidades.

Dado que a la nube de puntos se le aplicó un "Re muestreo" por distancia (20 cm) la nube de puntos presenta homogeneidad en su densificación de puntos, de modo que independiente del sector seleccionado las condiciones serán las mismas.

La nube de puntos 3D es analizada usando el software DSE. Como resultado se obtiene la densidad de polo de los vectores normales del sector analizado (***Figura 46***), en tanto la asignación de una familia de discontinuidad (familias J1, J2 y J3) a cada punto es representado en la Figura **47**.

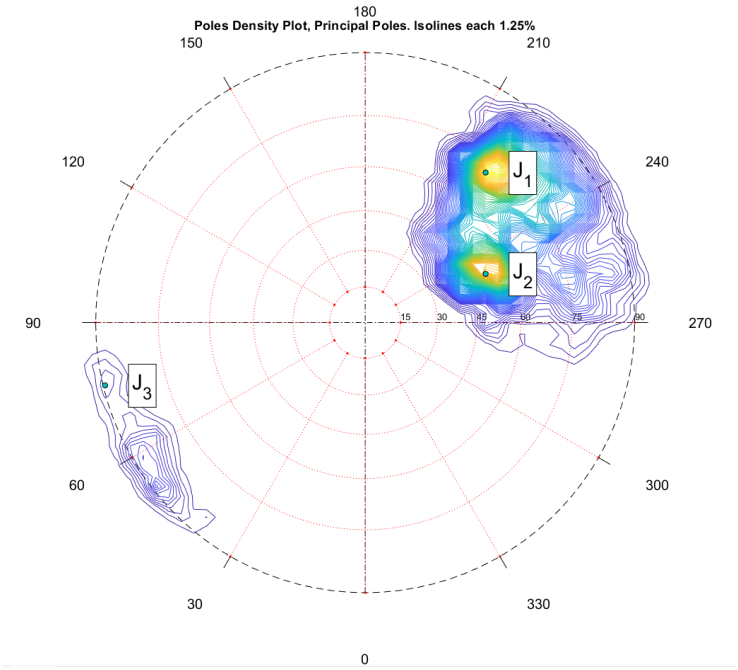


Figura 46, Grafico de densidad de vectores normales de los diferentes planos. Se identifican 3 polos principales: J1 (76/222), J2 (51/244), J3 (90/78). isolíneas son graficadas cada 1,25%

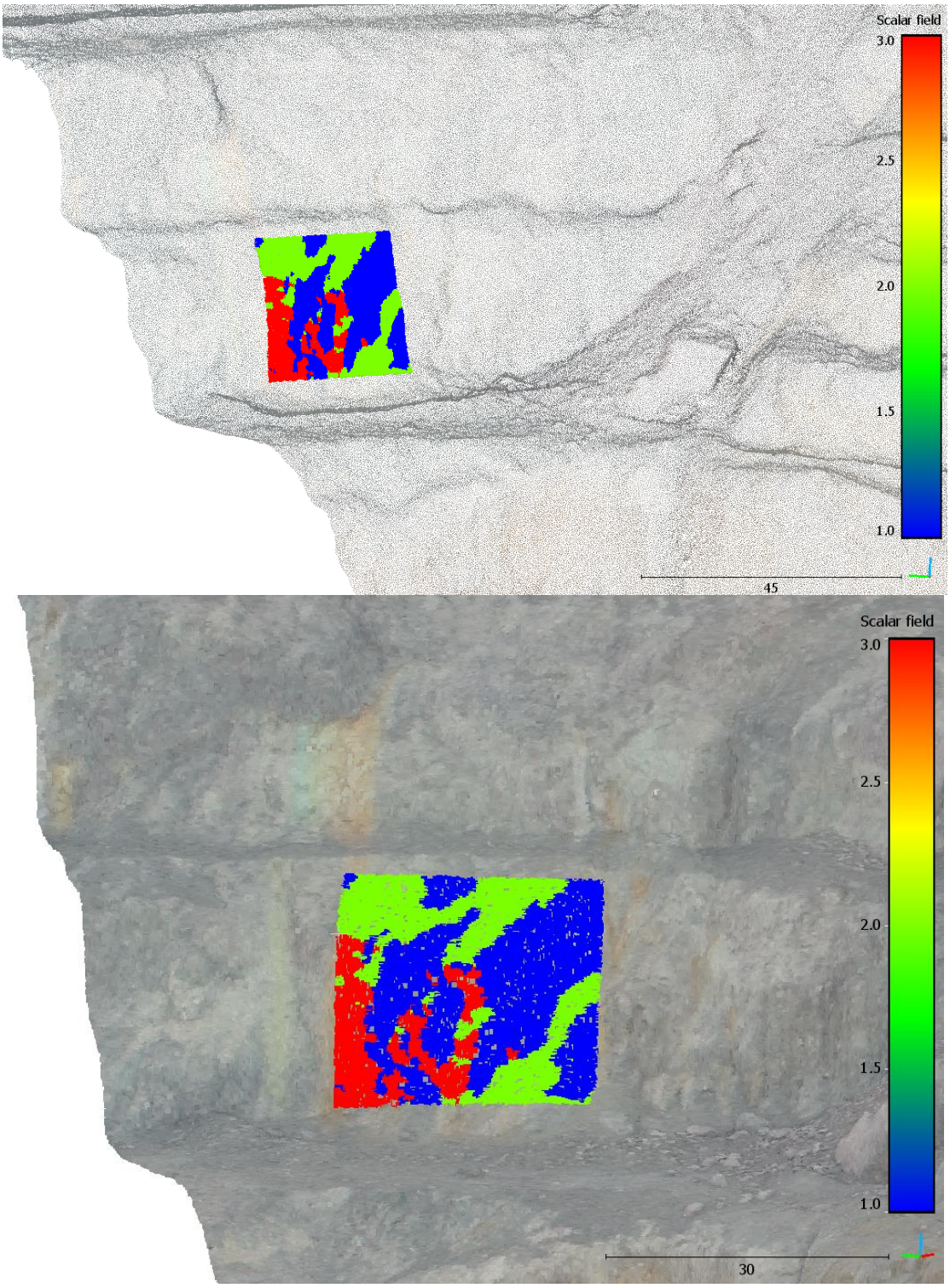
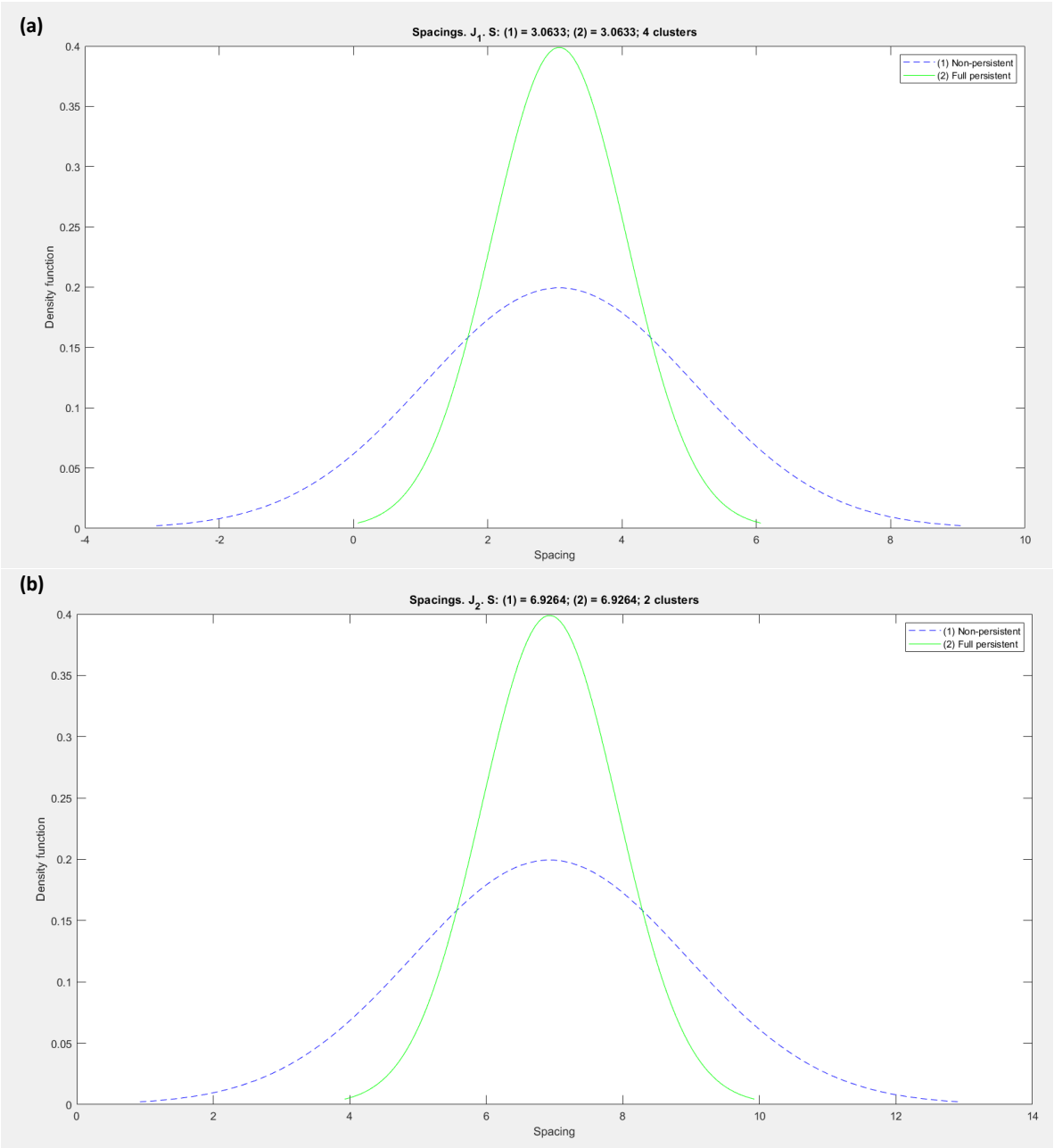


Figura 47, Representación de la clasificación de las tres familias de discontinuidad identificadas. Software CloudCompare.

Obtenida las familias de discontinuidades el software DSE, calcula el espaciamiento promedio asociado a estas familias. En la Figura **48**, se presenta la grafica de espaciamiento para cada una de las familias J1, J2 y J3, considerando la persistencia de la discontinuidades y la no persistencia, logrando concluir que al considerar las discontinuidades la función densidad aumenta, vale decir, existe un mayor número de estructuras.



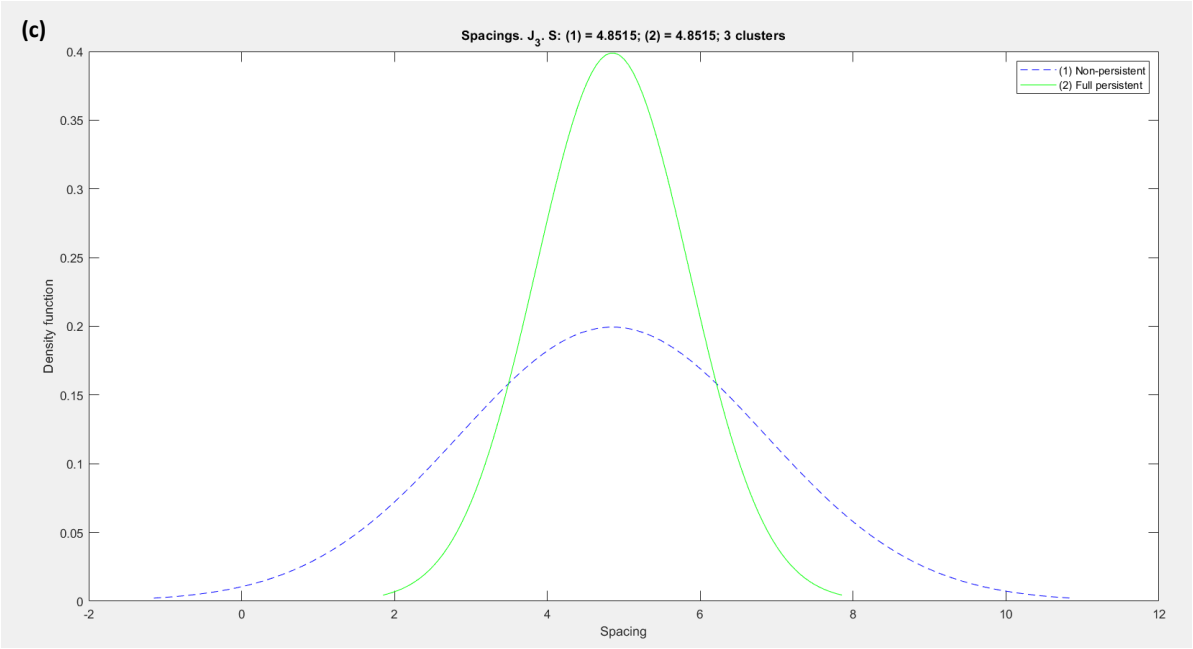


Figura 48, Análisis estadístico de espaciamiento por Familia de discontinuidades. Función densidad no paramétrica de los valores de espaciamiento: (a) J1, (b) J2 y (c) J3.

En la Figura **49**, se muestra la extracción de la persistencia de una discontinuidad dentro de la familia de discontinuidad J1, se observa los miembros de un plano en especifico.

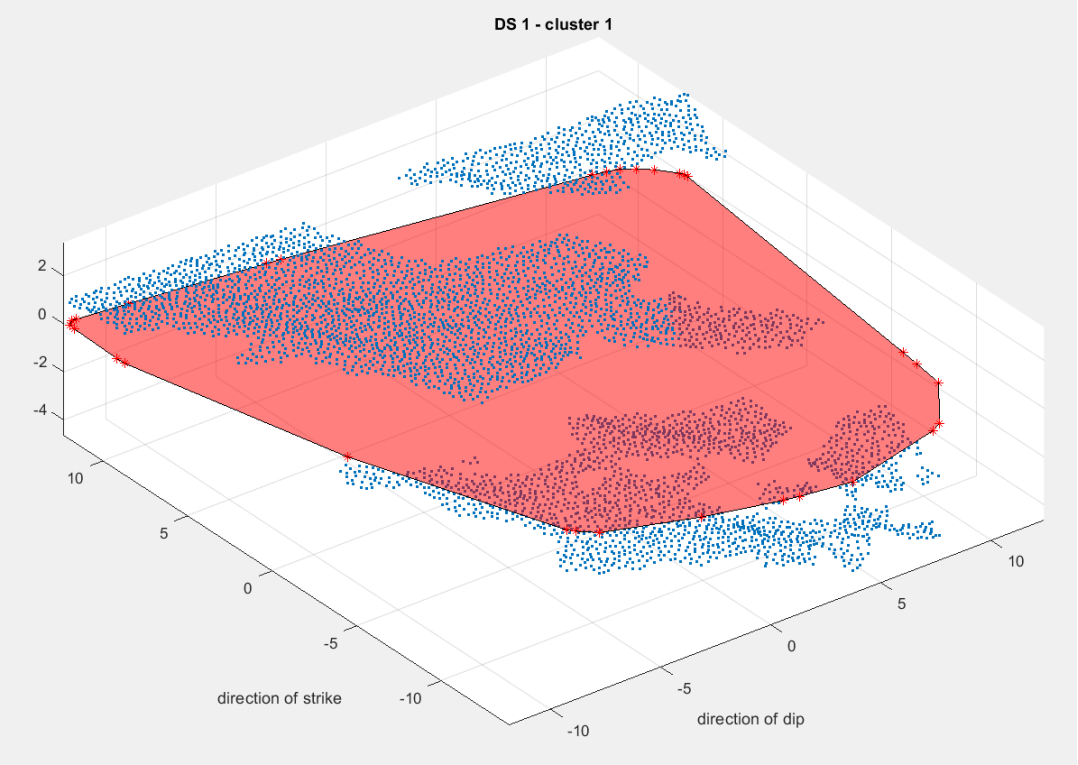


Figura 49, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J1 asociado a un plano de clúster en específico.

De forma homóloga se realiza el proceso para la extracción de la persistencia de discontinuidad dentro de discontinuidad J2 y J3 en las Figura **50** y Figura **51**, respectivamente.

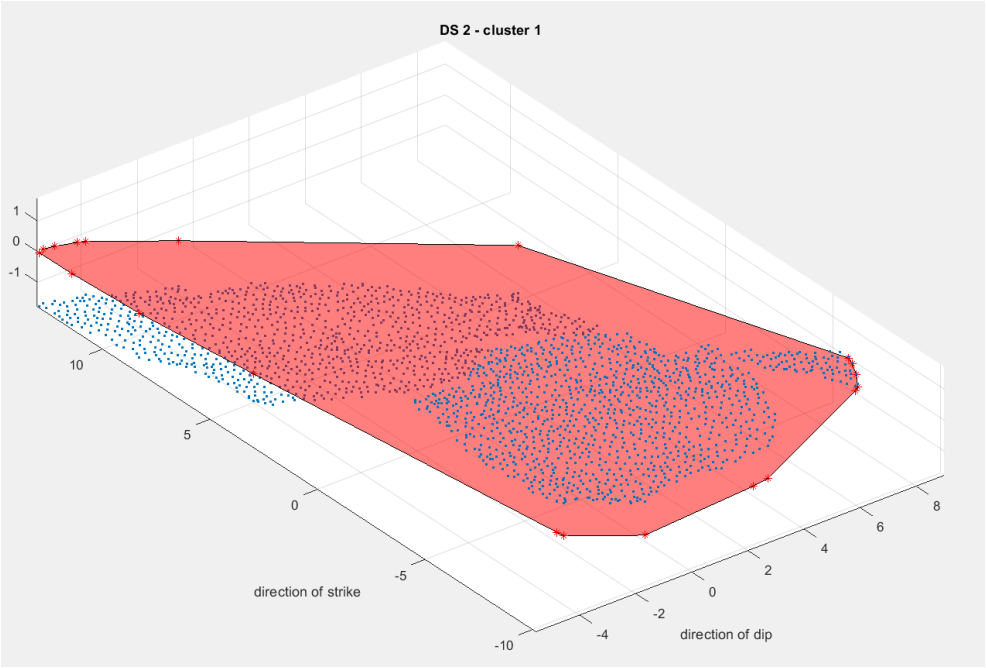


Figura 50, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J2 asociado a un plano de clúster en específico.

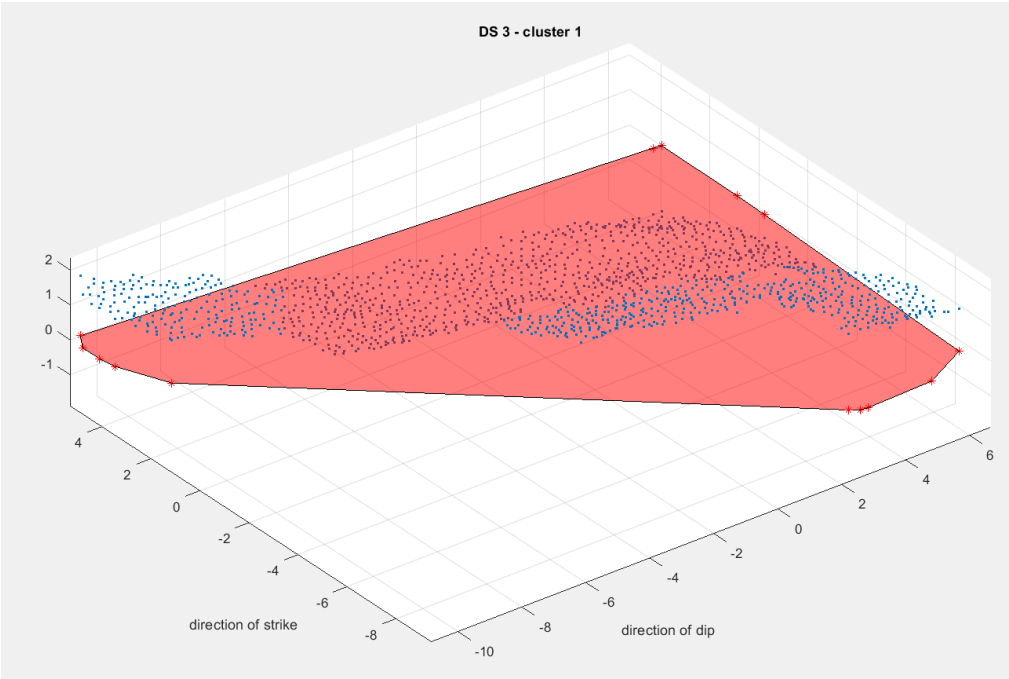


Figura 51, Extracción de persistencia de discontinuidad dentro de Familia Discontinuidad J3 asociado a un plano de clúster en específico.

Como resumen software DSE permite la representación grafica de la persistencia de acuerdo con la familia de discontinuidad y la dirección en que se realizo el calculo (dip, rumbo), junto la persistencia máxima y el área asociado al plano de clúster generado (Figura **52**)

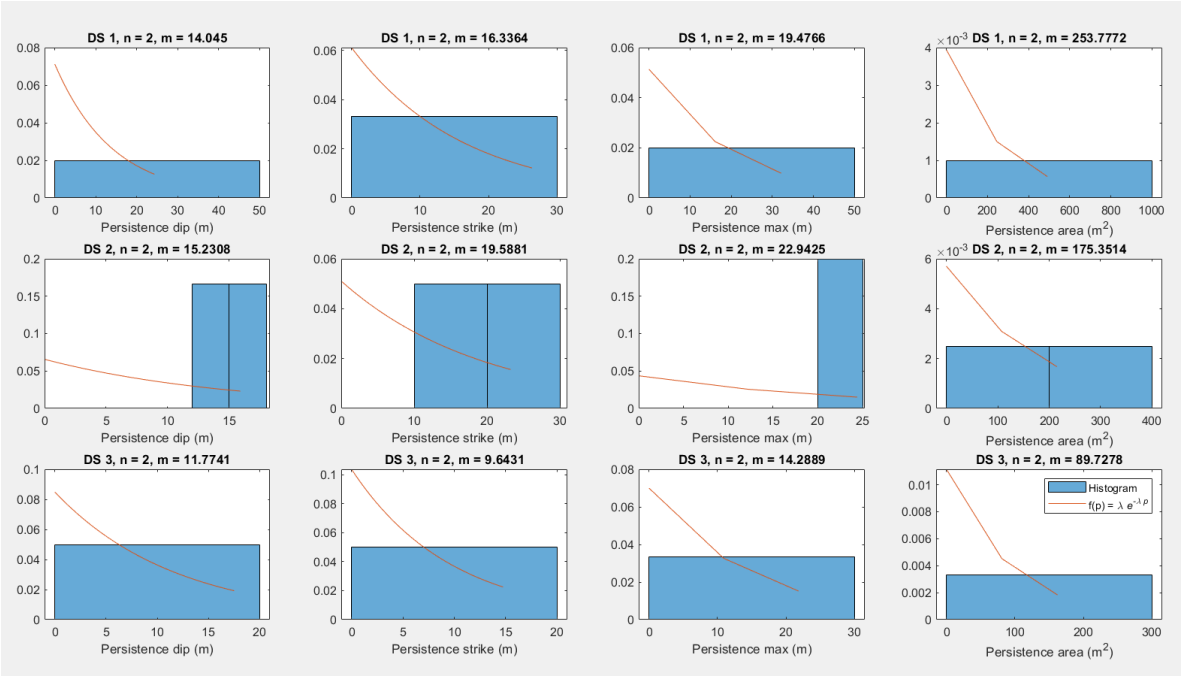


Figura 52, Persistencia medida (m) en la dirección de Dip, Rumbo, longitud máxima dentro del casco convexo y área (m2), para los tres Set de Discontinuidades (DS).

Para interpretar estos valores se presenta en el esquema de la transformación (Figura **53**), la cual permite representar la extracción directa de la máxima persistencia de discontinuidad medida en las direcciones del Rumbo (strike) y Buzamiento (DipDir), según ISRM (Barton, 1978).

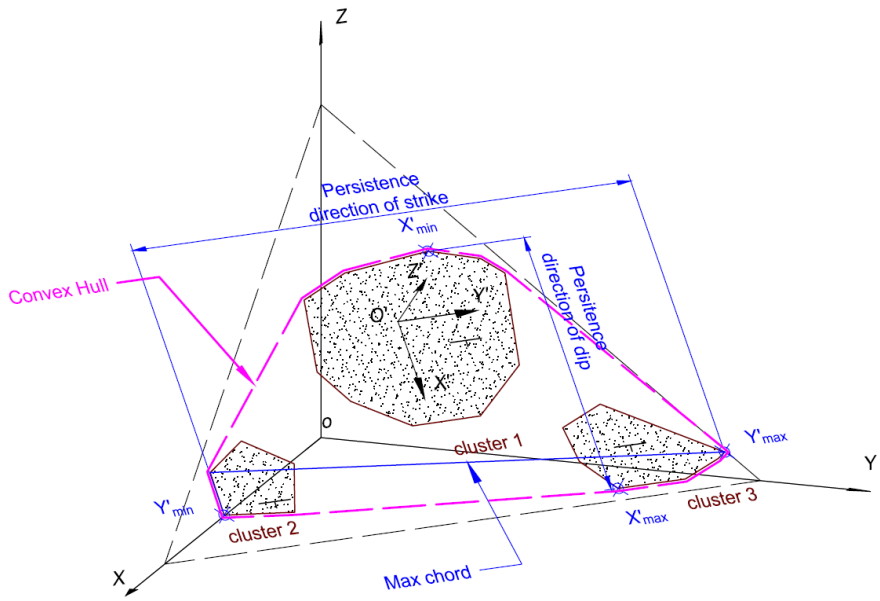


Figura 53, Perspectiva de la nube 3D para tres fragmentos de discontinuidad. Tres clúster son identificados como coplanares, generando la "carcasa" convexa de color magenta que permite delimitar el plano. Se identifica la persistencia dirección del Rumbo (strike), Buzamiento (DipDir) y la longitud máxima de la persistencia.

Se presenta la ***Tabla 12*** con el resumen de los resultados obtenidos a partir del área de estudio.

DS	Orientación (°)	Espaciado Normal (m)	Persistencia (m)		
			Rumbo (Strike)	Buzamiento (DipDir)	Max
J_1	76/222	3,1	14,1	16,3	19.5
J_2	51/244	6,9	15,2	19,6	22,9
J_3	90/78	4,9	11,8	9,6	14,3

Tabla 12, Set de discontinuidades extraídas y sus principales propiedades.

Posteriormente se procede al cálculo del Volumetric Joint (Jv), que se define como el número de diaclasas que cruzan con un volumen de m^3. Palmstrom (Palmstrom, 1974) define el Volumetric Joint como:

$$J_v = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{J_{V_i}}$$

Ecuación 3, Volumetric Joint (Jv).

Donde J_{V_i} corresponde al espaciamiento promedio para los sets de discontinuidades.

Obteniéndose:

$$J_v = 0{,}206 \left(\frac{joints}{m^3}\right)$$

Mediante la correlación entre RQD y Jv:

$$RQD = 115 - 3{,}3\, J_v$$

Ecuación 4, Correlación entre Volumetric Joint (Jv) y Rock Quality Designation (RQD). (Palmstrom, 1974)

Como $J_v < 4{,}5$, se considera $RQD = 100$.

Un RQD = 100, indica que la calidad del macizo rocoso es Muy Buena, sin embargo, se debe considerar que se consideró solo una sección de 30x30m y que de acuerdo con el análisis visual se encuentra muy bien constituido y sin fracturamiento visible. Lo interesante de esta herramienta es que permite sectorizar y definir zonas de interés donde es requerido conocer el valor del índice de calidad de roca.

5.2) ANÁLISIS ESCÁNER LASER

El estudio considera la toma de nube de puntos de forma diaria en horario 02:00 AM, 08:00 AM, 14:00 PM y 20:00 PM, la cual es comparada con los datos obtenidos del día siguiente, y así la del día siguiente con el subsiguiente. De esta forma es posible obtener datos históricos del comportamiento de los movimientos de tierras que posee este muro.

En la ***Figura 54*** se presenta una vista en planta de la nube de puntos resultante de la superposición de la captura de los escáneres capturada a las 02:00 AM. Donde se obtiene el valor de “M3C2 Distnace” correspondiente al valor promedio de la distancia entre nube de puntos (en unidades de metro).

Se observa que se concentra los cambios significativos en zona Norte del Muro del Tranque, de acuerdo con el valor de “M3C2 Distance”, existen zonas que se aumentó el volumen de material, evidenciado por los colores naranjo y rojo, de acuerdo con la zona se registra un aumento en la cota de nivel de tierras que varía entre 0,3 -1,7 m y otras zonas donde se disminuyó (colores verde y azul), en un rango de 0,17 – 1,3 m.

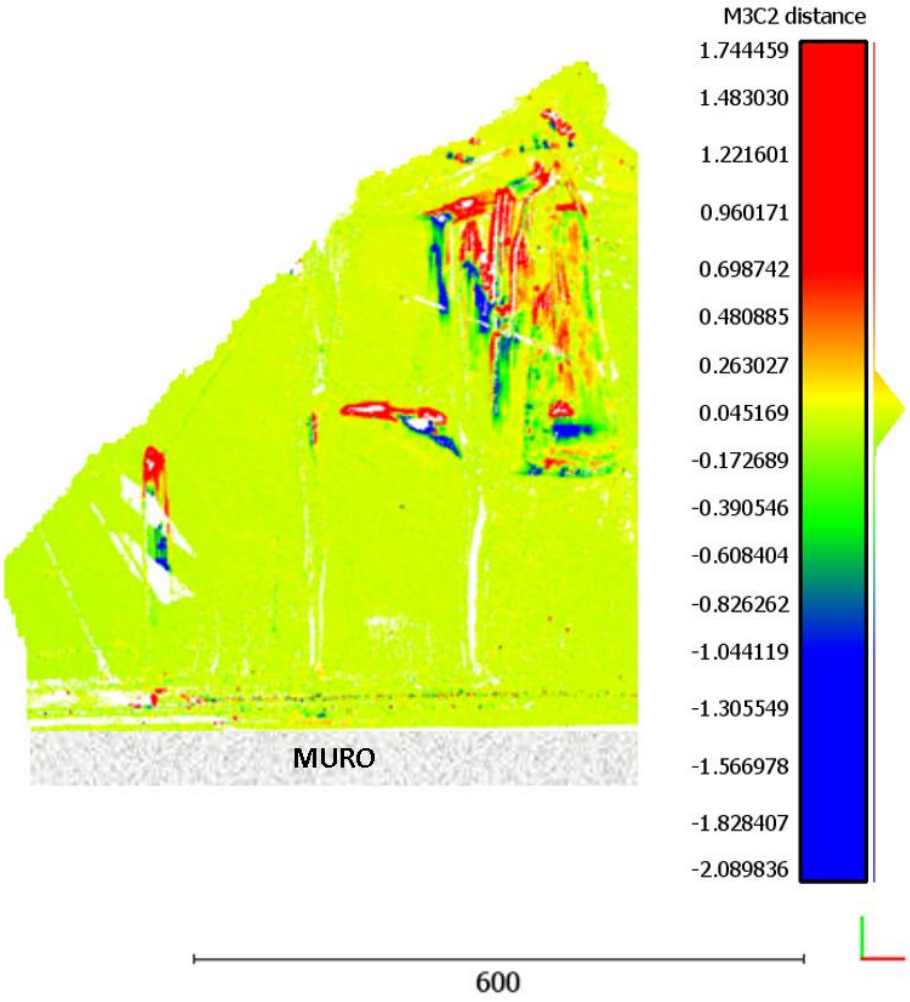


Figura 54, Vista en planta de nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 02:00 AM

El algoritmo M3C2 adicionalmente entrega campos escalares como lo es “Distance Uncertainty” (adimensional) donde mientras más cercano a 0 sea su valor, indica una mejor ejecución del algoritmo, mayor certeza del valor obtenido. En la ***Figura 55*** se observa que en general los valores se encuentran bajo los 0,08, lo que indicaría una correcta ejecución del algoritmo.

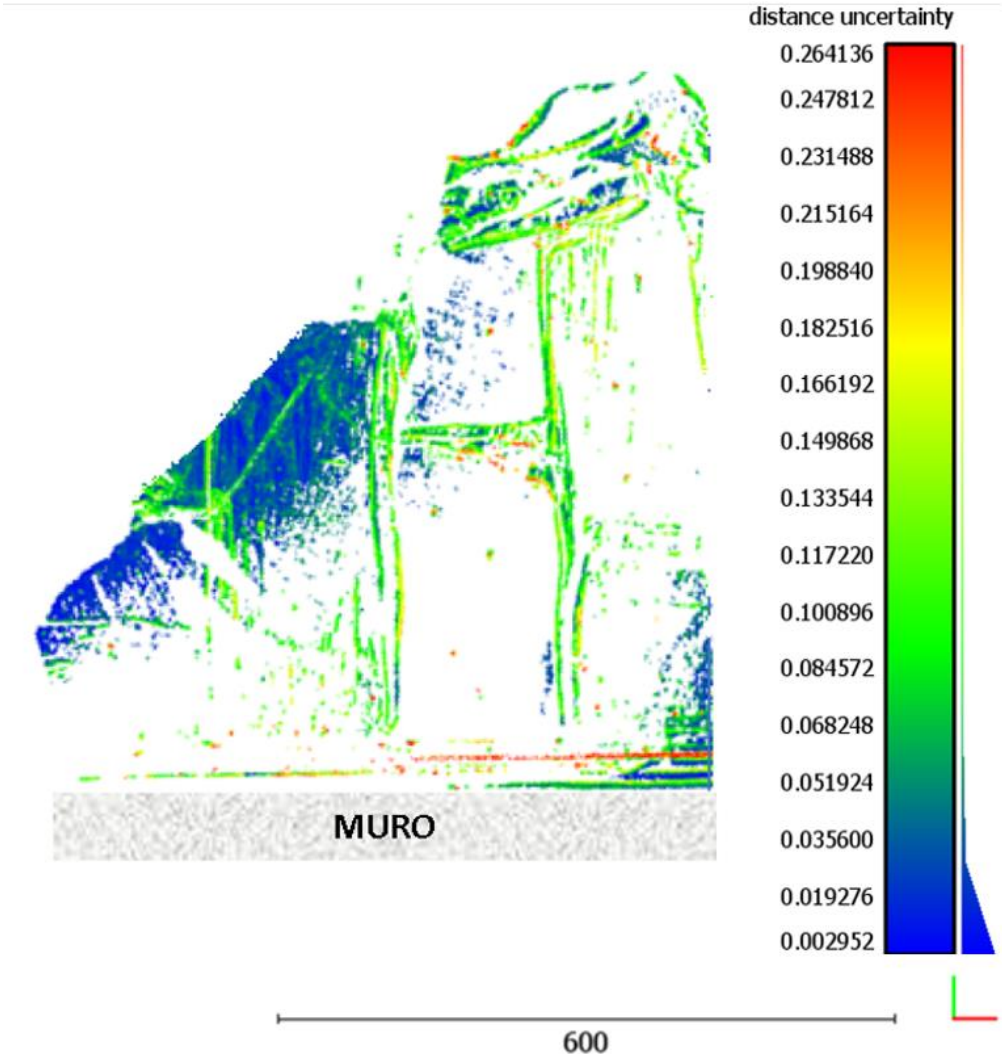


Figura 55, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 02:00 AM

En la Figura **56** se presenta la nube de puntos resultante de la superposición de la captura de los escáneres capturada a las 08:00 AM.

Se observa que se concentra los cambios significativos en zona Norte del Muro del Tranque, de acuerdo con el valor de “M3C2 Distance”, existen zonas que se aumentó el volumen de material, evidenciado por los colores naranjo y rojo, de acuerdo con la zona se registra un aumento que varía entre 0,1 – 1,0 m y otras zonas donde se disminuyó el volumen (azul), en un rango de 0,4 – 0,7 m.

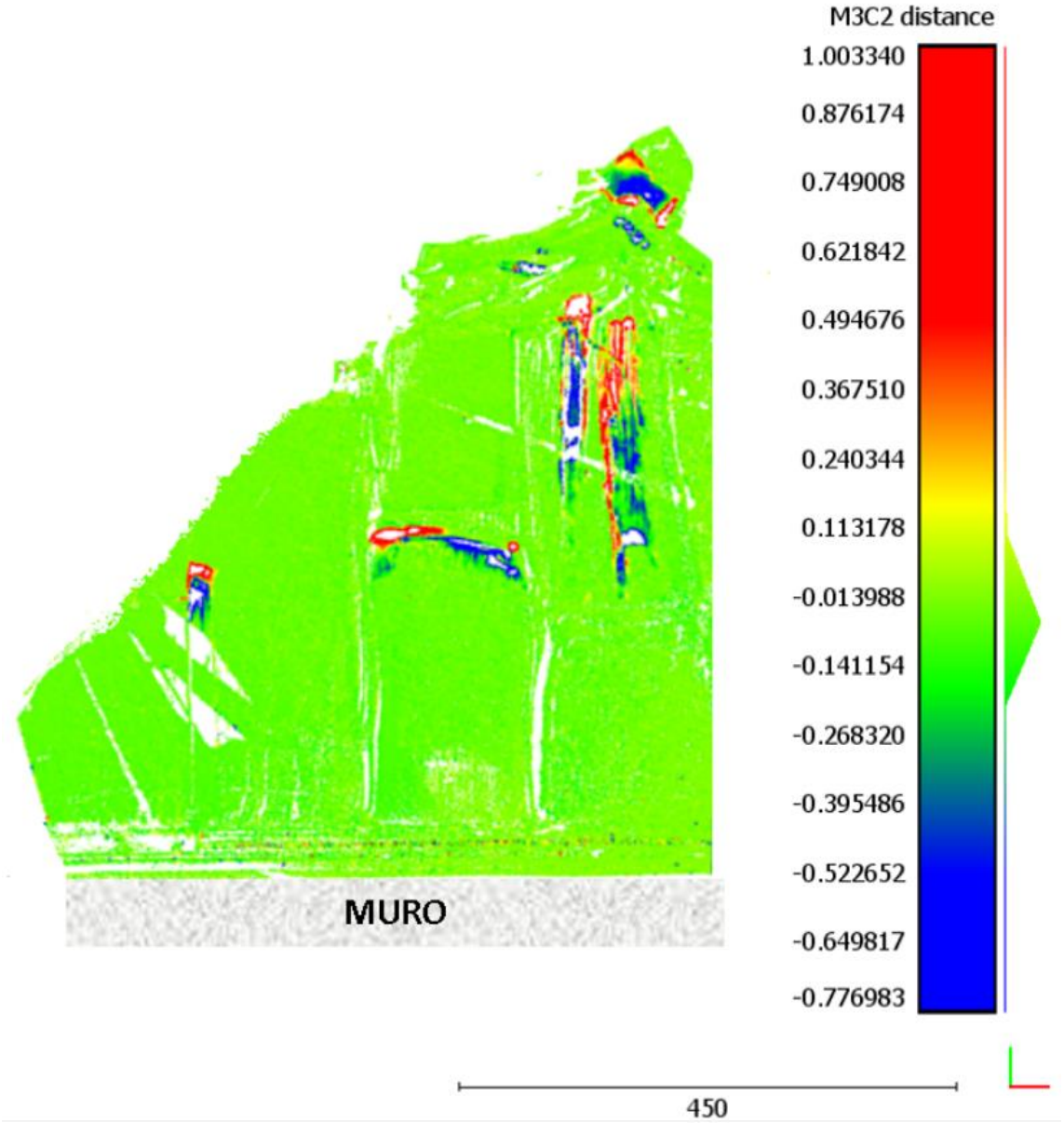


Figura 56, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 08:00 AM

En la ***Figura 57*** se observa que en general los valores se encuentran bajo los 0,06, lo que indicaría una correcta ejecución del algoritmo.

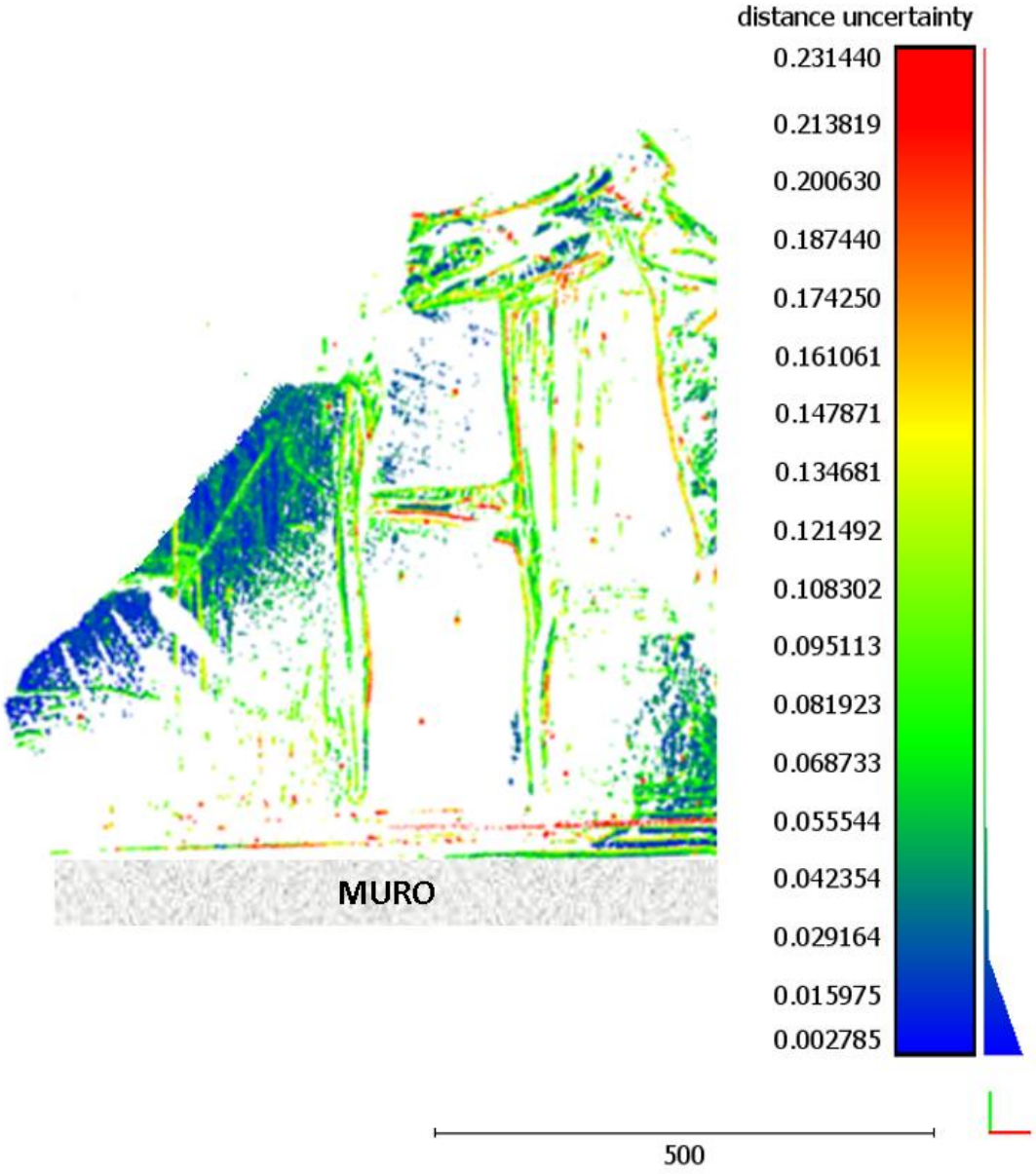


Figura 57, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 08:00 AM

En la Figura **58** se presenta la nube de puntos resultante de la superposición de la captura de los escáneres capturada a las 14:00 PM.

Se observa que se concentra los cambios significativos en zona Sur, Norte y Oeste del Muro del Tranque, de acuerdo con el valor de “M3C2 Distance”, existen zonas que se aumentó el volumen de material, evidenciado por los colores naranjo y rojo, de acuerdo con la zona se registra un aumento que varía entre 0,1 – 0,7 m y otras zonas donde se disminuyó el volumen (verde y azul), en un rango de 0,2 – 1,0 m.

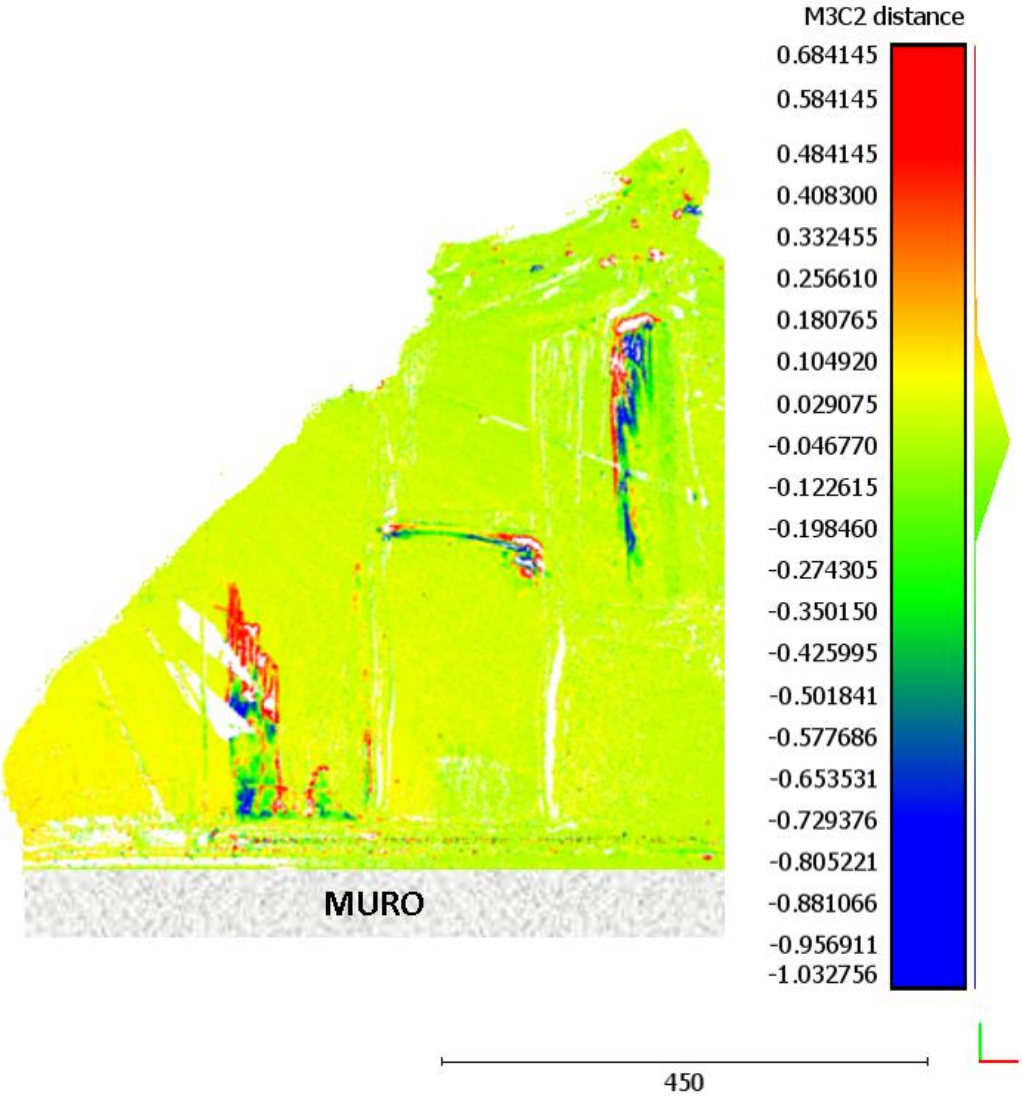


Figura 58, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 14:00 PM

En la ***Figura 59*** se observa que en general los valores se encuentran bajo los 0,08, lo que indicaría una correcta ejecución del algoritmo.

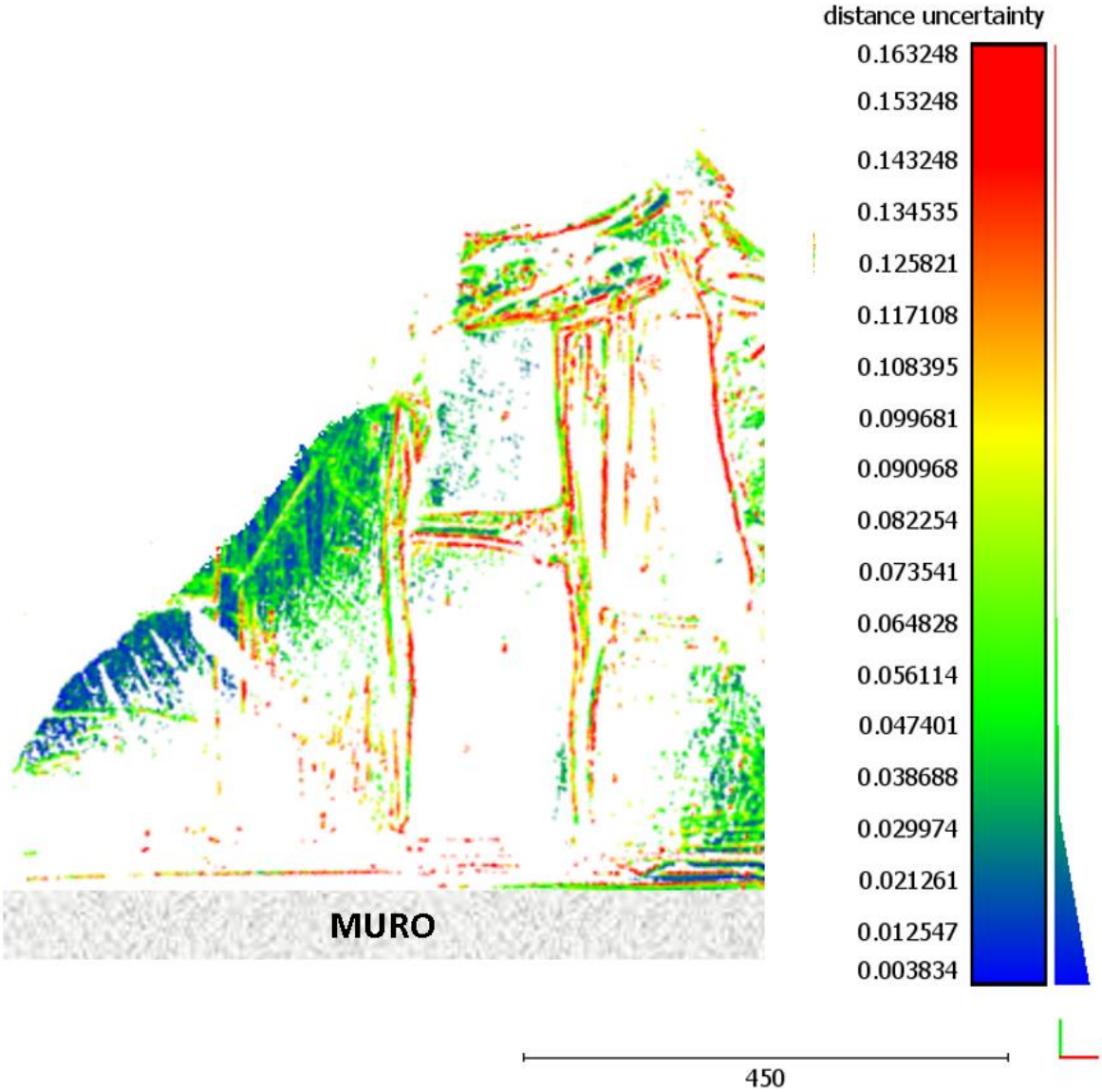


Figura 59, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "Distance Uncertainty", valor adimensional. Captura 14:00 PM

En la ***Figura 60*** se presenta la nube de puntos resultante de la superposición de la captura de los escáneres capturada a las 20:00 PM.

Se observa que se concentra los cambios significativos en zona Sur, Norte y Oeste del Muro del Tranque, de acuerdo con el valor de “M3C2 Distance”, existen zonas que se aumentó el volumen de material (naranjo y rojo), de acuerdo con la zona se registra un aumento que varía entre 0,03 – 0,8 m y otras zonas donde se disminuyó el volumen (verde y azul), en un rango de 0,1 – 0,9 m.

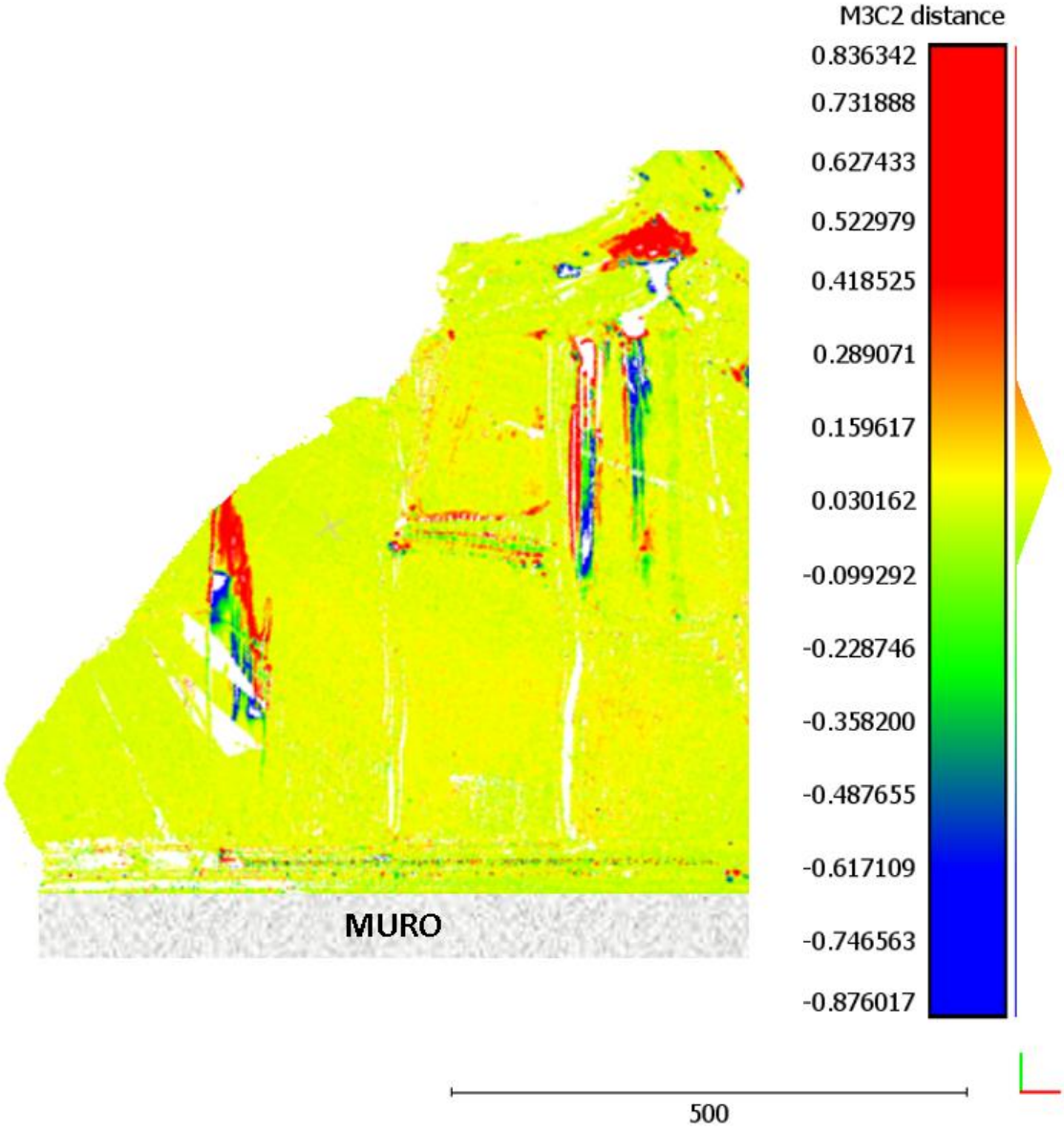


Figura 60, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Muestra el valor de "M3C2 Distance" en unidad de metros. Captura 20:00 PM

En la ***Figura 61*** se observa que en general los valores se encuentran bajo los 0,13, lo que indicaría una correcta ejecución del algoritmo.

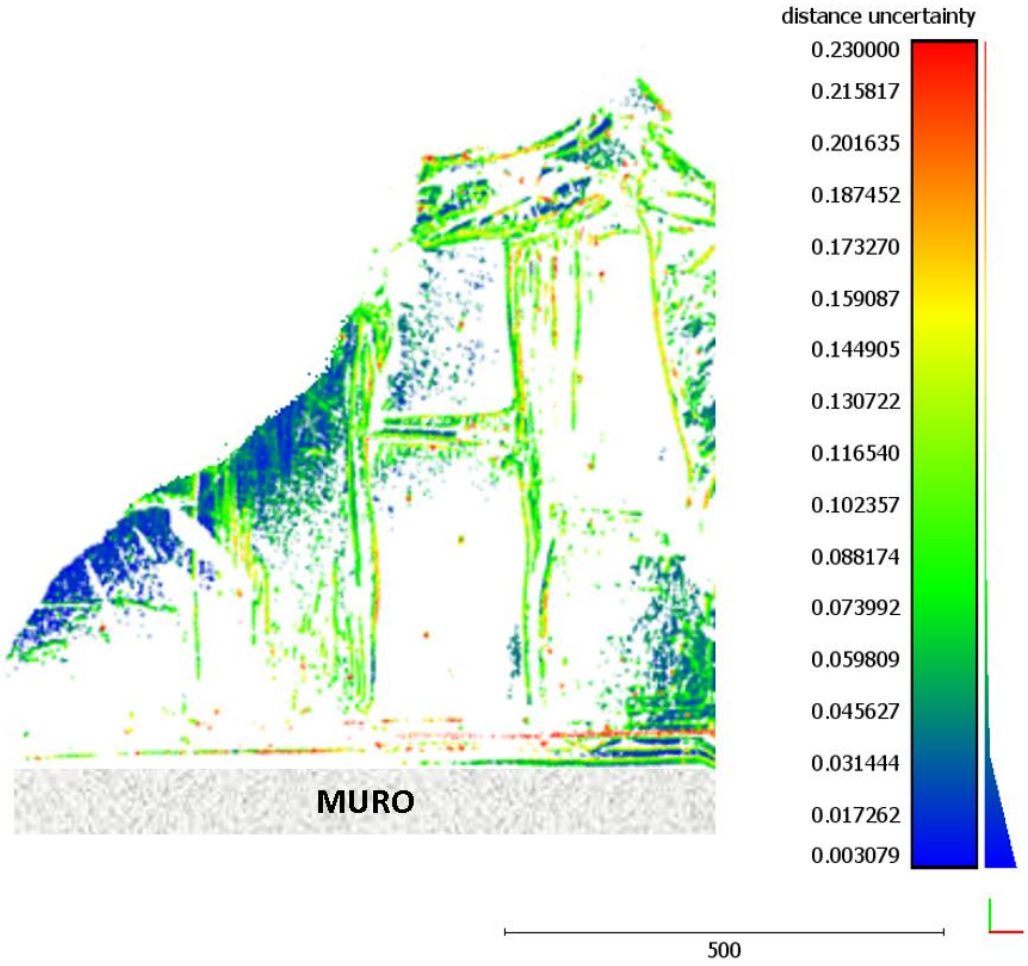


Figura 61, Nube de puntos resultante de la superposición de los 3 escáner. Captura 20:00 PM.

Se resumen los resultados anteriores en la siguiente tabla:

Horario	Distancia M3C2 (m)		Incertidumbre de la distancia (m)
	Disminución	Aumento	
02:00 AM	0,17 – 1,3	0,3 – 1,7	0,08
08:00 AM	0,4 – 0,7	0,1 – 1,0	0,06
14:00 PM	0,2 – 1,0	0,1 – 0,7	0,08
20:00 PM	0,1 – 0,9	0,03 – 0,8	0,13

Tabla 13, Resultados de cálculo de distancia M3C2, de las nubes de puntos para los horarios indicados asociado a la lectura de dos días.

A partir de los valores de distancia M3C2 obtenidos en los diferentes horarios (***Tabla 13***) se desprende que existe un alto movimiento de tierra en el área, valores que se asocian a las labores que ejecutan equipos de excavadoras y bulldozer, cuya función es la compresión de las tierras que cubren el muro de tranque de relave. En la ***Figura 62*** se presenta una visión general del muro del tranque de relave, donde es posible identificar diferentes zonas de trabajo, en la ***Figura 63*** se hace un acercamiento identificando las huellas del balde de la excavadora que trabaja y se muestran los equipos que se encuentran estacionados en zonas cercanas.

Figura 62, Ortomosaico del muro del tranque de relave estudiado.

Figura 63, Huellas de trabajo de excavadoras (imagen superior), equipos estacionados en sectores de trabajo (imagen inferior).

Dentro de los campos escalares que entrega el algoritmo M3C2 está el valor de Incertidumbre de la Distancia, el cual permite evaluar si el algoritmo generó un buen cálculo. Mientras más cercano a cero sea éste, indica mayor "confianza" en la ejecución del cálculo. Desde la ***Tabla 13*** tenemos que los cálculos varían entre 0,06 – 0,13; indicando una buena ejecución del cálculo de distancia y que los valores obtenidos son representativos de la realidad.

6) **ALGORITMO MAPEO GEOTECNICO**

6.1) ALGORITMO IDENTIFICACIÓN DISCONTINUIDADES

En base a los objetivos planteados al principio de este documento se busca desarrollar un algoritmo que permita reconocer el espacio entre set de estructuras, espaciamiento, volumen de diaclasas, frecuencia de espaciamiento y otros parámetros geotécnicos.

Basado en la bibliografía consultada se propone utilizar como base la metodología adoptada en el Método de extracción de discontinuidades con nubes de puntos 3D (DSE, Discontinuity Set Extractor) (Figura 64) desarrollado por Adrián Riquelme Guill en su Tesis Doctoral "Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica" (Riquelme Guill, 2015).

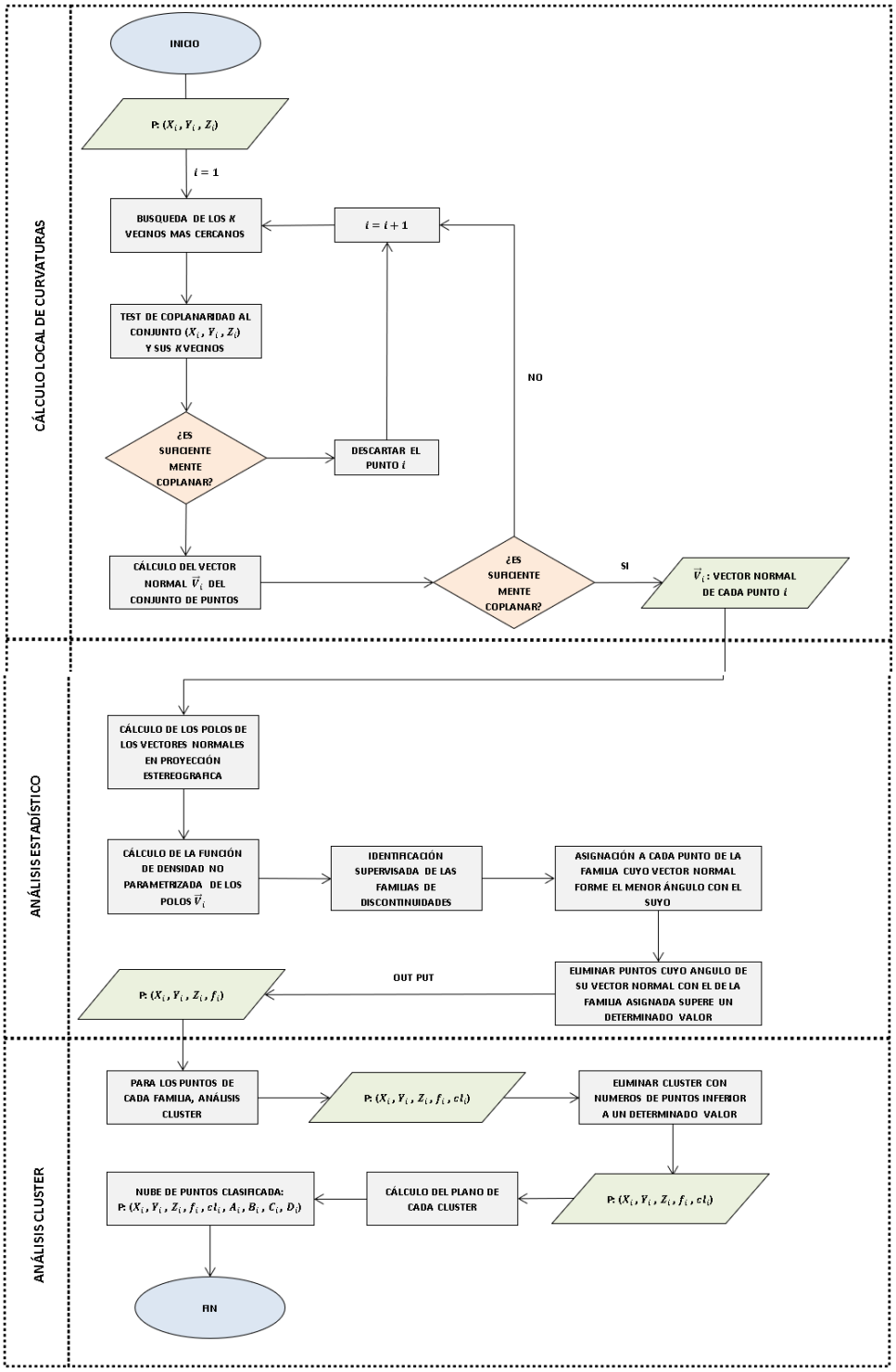


Figura 64, Algoritmo Extracción de Discontinuidades con Nube de Puntos 3D

6.2) ALGORITMO CÁLCULO DEL ESPACIADO NORMAL

Basado en la bibliografía consultada se propone utilizar como base la metodología adoptada por Adrián Riquelme Guill en el estudio "Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds" (Riquelme et al., 2015).

Mediante técnicas de teledetección como LiDAR y Fotogrametría permiten realizar una medición más realista y precisa del espaciado de discontinuidades en tres dimensiones para cada conjunto de discontinuidades. Lo cual supone una ventaja significativa a otro tipo de métodos, ya que los miembros de los afloramientos rocosos de un conjunto de discontinuidades no suelen ser perfectamente paralelos debido a la complejidad de la estructura natural.

6.2.1) DATOS DE ENTRADA

Cada punto de la nube de puntos debe asignarse previamente a un conjunto de discontinuidades y a un grupo determinado, es decir, los datos de entrada necesaria corresponden al ***Output*** del **Algoritmo DSE** descrito en los puntos anteriores. Las entradas necesarias para cada punto son:

- Coordenadas (X, Y, Z)
- Id, Set Discontinuidad
- Id Clúster
- Vector Normal del Set Discontinuidad (A, B, C)
- Vector Normal del Clúster (A, B, C)
- Posición del Plano del Clúster: Parámetro D

Donde la ecuación del plano es escrita como:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \; [A, B, C, D] \in \mathbb{R}$$

Ecuación 5, Ecuación del plano asociada a la discontinuidad.

6.2.2) CÁLCULO DEL ESPACIADO DE DISCONTINUIDAD 3D

El espaciado normal es la distancia entre planos de discontinuidad medidos a lo largo de una línea de exploración ortogonal (Palmstrom, 2001), sin embargo, esta definición no es aplicable cuando los datos son afloramientos planos de discontinuidad no vinculados y distribuidos en el espacio, dado que los planos pueden no estar cruzados por una línea de exploración ortogonal, por lo que se hace necesario definir alguna hipótesis para aplicar la definición anterior.

Los métodos existentes asumen la persistencia total de las discontinuidades, en la metodología planteada se incluye las discontinuidades no persistentes, además considera las relaciones tridimensionales entre clúster, calculando el espaciado midiendo la distancia ortogonal entre un clúster dado y su clúster vecino más cercano.

Lo anterior se representa de mejor forma en la ***Figura 65***, donde con el fin de una explicación más simple y completa las discontinuidades se han representado en 2D. Esta figura muestra una sección transversal ortogonal de la nube de puntos que contiene seis clúster diferentes y los diferentes enfoques utilizados para el cálculo del espaciado normal.

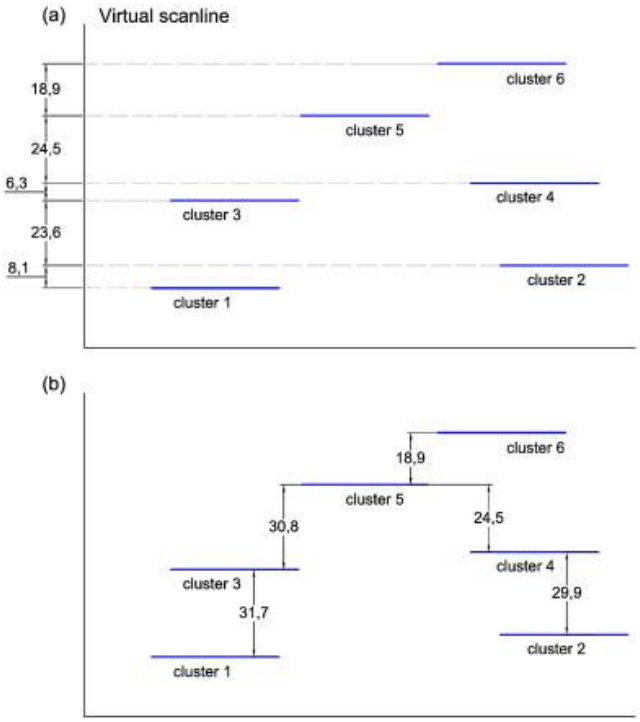


Figura 65, Sección transversal ortogonal de la nube de puntos que contiene 6 clúster diferentes. En (a) se considera el espaciamiento entre clúster considerando con persistencia, en tanto (b) muestra el cálculo de espaciamiento considerándolo como no persistente.

Para el cálculo de la distancia entre clúster se opera de la siguiente forma:

1. Todos los planos de clúster se ordenan en orden ascendente utilizando el parámetro D, dando como resultado la lista Dsorted.
2. El algoritmo crea el conjunto de puntos R, que incluye todos los puntos del conjunto de discontinuidades omitiendo los puntos contenidos en el primer grupo. Para cada punto de este grupo, el algoritmo busca el punto vecino más cercano dentro del conjunto de datos R. El punto más cercano es miembro de su grupo más cercano y, por lo tanto, su distancia correspondiente es el espacio entre estos dos grupos.
3. El algoritmo continúa con el siguiente clúster correspondiente en la lista Dsorted (Los puntos de este grupo se excluyen del conjunto de datos R para no repetir los cálculos de espaciamiento).
4. El proceso continúa hasta que se calculan todos los clústeres.
5. Finalmente se proporciona una lista de valores de espaciado, incluidos los identificadores de clúster utilizados para este cálculo.

7) **CONCLUSIONES**

Durante el proceso de este proyecto se dio cumplimiento los objetivos generales y específicos dado que se desarrolló mapeo geotécnico mediante fotogrametría de los taludes de mina El Soldado, a partir de la captura de datos desde Drones, permitiendo identificar las familias de discontinuidades, persistencia e índice de calidad de roca RQD asociada a dichos taludes. También fue desarrollado el monitoreo geotécnico de un muro de un tranque de relave mediante el análisis de desplazamiento de nubes de puntos obtenidas a partir de estaciones robóticas. Ambos métodos corresponden a una alternativa a los métodos tradicionales en terreno, donde se obtuvo como principal mejora: la cantidad y calidad de la data, menores tiempos de implementación y la baja o nula incidencia de los profesionales en terreno, permitiendo dedicar más tiempo al análisis y reduciendo su exposición al riesgo. Finalmente se entrega un algoritmo basado en el procesamiento de la información obtenida que permite el cálculo de parámetros geotécnicos.

De las etapas de captura, proceso y análisis de los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- La técnica de fotogrametría a partir de los datos obtenidos desde vuelos de Drones, representa una alternativa real al realizar mapeos geotécnicos, dado que proporciona ventajas significativas a los métodos tradicionales (scanline, campañas en terreno), entre ellos se encuentran: una mayor y mejor toma de datos, menores tiempos en terreno, la exposición al riesgo es nula al considerar que los profesionales encargados de la toma se encuentran en zonas seguras, como también la cobertura se ve mejorada al lograr acceder a aéreas inaccesible.

- El software Discontinuity Set Extractor (DSE) es una de las pocas herramientas de uso libre que permite la extracción de las familias de discontinuidades a partir de una nube de puntos 3D, sea está obtenida a partir de escáner Laser o mediante fotogrametría. El caso de estudio del presente proyecto corresponde a un talud de mina El Soldado, Angloamerican, en específico asociado a su fase 3 de producción. Del estudio se obtiene que existen 3 familias de discontinuidades J1 (44/273), J2 (3/314), J3 (85/268). Al realizar análisis cinemático y estudio de afloramiento de las discontinuidades se obtiene que el talud presenta un 31,6% y 50,9% de estructuras criticas a fallar por tipo Planar y Toppling Directo, respectivamente.

- La Falla tipo Toppling Directo junto con Falla Planar presentan el mayor porcentaje de probabilidad de ocurrencia, 70% y 58% respectivamente, en donde familia J1 y J2 concentran las estructuras críticas con probabilidad de falla tipo Plana (con y sin límites). En tanto, las estructuras con probabilidad de falla de tipo Toppling Directo están presenten en las 3 familias, con mayor concentración en familia J1 y J3.

- El valor del índice RQD es obtenido desde la correlación entre Volumetric Joint (Jv) y el RQD (***Ecuación 3***), el cual relaciona el espaciamiento promedio entre los conjuntos de discontinuidades por m^3. Para ello se consideró una sección de área correspondiente a la altura de un banco de la fase 3 (banco doble de 30 m) y un ancho de 30 m, permitiendo el cálculo de espaciamiento normal junto con la

persistencia de las estructuras. Proceso realizado mediante software DSE, obteniendo un $J_v = 0{,}206\ \left(\frac{joints}{m^3}\right)$ el cual al ser menor que 4,5 entrega un $RQD = 100$, indicando una calidad Muy Buena de la roca.

- El uso de estaciones robóticas con escáner laser es una herramienta que complementa o mejora las labores de topografía en terreno que permite la detección de deformaciones geotecnias, operacionales que experimenta una estructura, dado que aumenta la cobertura, seguridad, precisión y eficiencia del proceso al compararlo con topografía tradicional. La segunda parte del Capítulo 3 "Mapeo Geotécnico", tiene como objetivo aplicar esta técnica al monitoreo del muro de un tranque de relave, mediante el estudio de las diferencias de distancia entre nube de puntos obtenidas mediante tecnología escáner laser, para lo cual se propone el estudio y uso del del algoritmo M3C2, el cual está incluido el software Cloudcompare. Obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla **13**.

  Donde la mayor variación se encontró a las 02:00 AM con un aumento de hasta 1,7 m y una disminución de 1,3 m, de acuerdo con la ***Figura 54*** estos dos extremos se encuentran contenidos en una misma zona, lo cual indicaría que están asociados a una labor de movimiento de tierras que fue efectuado donde se quitó volumen de un lado y fue desplazado a otro colindante.

- El monitoreo y detección de deformaciones mediante estaciones robóticas (escáner laser) sugiere ventajas significativas a los levantamientos topográficos convencionales, dado que permite realizar escaneos a horas definidas por un usuario, mayor rapidez en toma de data permitiendo dedicar más tiempo en el estudio del comportamiento que devengara en una decisión operativa. Como se indicó en el punto anterior existen diferencias de niveles de suelo de hasta 1,7 m; valor suficiente para generar que un equipo se vuelque poniendo en peligro la integridad del operador, a la vez de dañar o incluso dejar inoperativa la maquinaria. En este sentido el monitoreo de estos desplazamientos de tierra permite aumentar la seguridad operativa y permiten la toma de decisiones a tiempo, previniendo consecuencias mayores.

- Se presentan los algoritmos asociados al desarrollo de Mapeo Geotécnico de taludes basados en el uso del software Discontinuity Set Extractor (DSE), el cual permite la extracción de familias de discontinuidades, en específico la orientación de los planos, espaciamiento y su persistencia. Permitiendo el obtener el valor del índice de calidad del macizo rocoso RQD.

- De igual manera se presenta el algoritmo M3C2 como una alternativa para el cálculo de distancias entre nubes de puntos. Mediante dos pasos, el primero considerando un vector normal local "N" estimado desde la nube de puntos 1, ajustando un plano a los puntos dentro de un radio; luego el segundo paso, mediante la proyección de un cilindro a lo largo de dicho vector normal. Finalmente se promedia la posición para cada nube, a lo largo del vector normal, usando los puntos contenidos dentro de cada cilindro, obteniendo así la distancia M3C2.

8) **BIBLIOGRAFÍA**

Álvarez, N., Hugo, H., 2010. La fotogrametría satelital (Thesis).

Application of laser scanning surveying to rock slopes risk assessment analysis [WWW Document], n.d. . ResearchGate. URL https://www.researchgate.net/publication/273685833_Application_of_laser_scanning_surveying_to_rock_slopes_risk_assessment_analysis (accessed 6.29.20).

Barton, N., 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses: International Society for Rock Mechanics. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 15, 319–368.

Birch, J.S., 2006. Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for Rock Face Characterisation. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization 15.

Bonneval, H., 1972. Photogrammétrie générale. Eyrolles.

Coelho, L., Brito, J.N., 2007. Fotogrametria digital. EDUERJ, Rio de Janeiro.

Cruden, D.M., 1977. Describing the size of discontinuities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 14, 133–137. https://doi.org/10.1016/0148-9062(77)90004-3

Davis, J.C., 1986. Statistics and data analysis in geology. New York, p. 646.

Duelis, C., 2015. Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto (Mestrado em Geotectônica). Universidade de São Paulo, São Paulo. https://doi.org/10.11606/D.44.2015.tde-08072015-150656

Ester, M., Kriegel, H.-P., Xu, X., 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise 6.

Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R., Voyat, H.I., 2009. Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. Rock Mech Rock Eng 42, 631–665. https://doi.org/10.1007/s00603-008-0010-4

Ferrero, A.M., Migliazza, M.R., Umili, G., 2014. Rock mass characterization by means of advanced survey methods 11.

Fotogrametria, 2009. . Universidad Politecnica de Valencia.

FOTOGRAMETRÍA CURSO 2008/2009 TITULACIÓN: I. T. TOPOGRAFÍA TEMA 1 INDICE - PDF Free Download [WWW Document], n.d. URL https://docplayer.es/14332796-Fotogrametria-curso-2008-2009-titulacion-i-t-topografia-tema-1-indice.html (accessed 8.5.20).

Hashash, Y., Asce, M., Finno, R., 2008. Development of New Integrated Tools for Predicting, Monitoring, and Controlling Ground Movements due to Excavations. Practice Periodical on Structural Design and Construction 13. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:1(4)

Hudson, J., Harrison, J., Popescu, M., 2002. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. Appl. Mech. Rev. 55, B30. https://doi.org/10.1115/1.1451165

James, M.R., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks: MITIGATING SYSTEMATIC ERROR IN TOPOGRAPHIC MODELS. Earth Surf. Process. Landforms 39, 1413–1420. https://doi.org/10.1002/esp.3609

Kraus, K., Waldhausl, P., Stewardson, P., 2000. Photogrammetry. V.1, Fundamentals and standard processes. Dummler, Bonn.

Kulatilake, P.H.S.W., Wathugala, D.N., Stephansson, O., 1993. Joint network modelling with a validation exercise in Stripa mine, Sweden. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 30, 503–526. https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92217-E

Lichti, D., Jamtsho, S., 2006. Angular Resolution of Terrestrial Laser Scanners. The Photogrammetric Record 21. https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00367.x

Palmstrom, A., 2001. Measurement and characterization of rock mass jointing. pp. 49–97.

Pearson, K., 1901. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 2, 559–572. https://doi.org/10.1080/14786440109462720

Priest, S.D., 1993. , in: Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall, London.

Priest, S.D., Hudson, J.A., 1976. Discontinuity spacings in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 13, 135–148. https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90818-4

Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. Computers & Geosciences 68, 38–52. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014

Riquelme Guill, A., 2015. Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica 205.

Roncella, R., Forlani, G., Remondino, F., 2005. Photogrammetry for geological applications: Automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5665. https://doi.org/10.1117/12.587822

Rosado, E.Q., 2014. , in: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Universidad de Extremadura.

Santamaría Peña, J., Sanz Mendez, T., 2011. Fundamentos de Fotogrametría. Universidad de la Rioja.

Terzaghi, R.D., 1965. Sources of Error in Joint Surveys. Géotechnique 15, 287–304. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287

Vallet, J., Skaloud, J., Kölbl, O., Merminod, B., 2000. Development of a helicopter-based integrated system for avalanche mapping and hazard management. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33.

Wyllie, D., Mah, C., 1974. Rock Slope Engineering Civil and mining.

Zeeb, C., Bons, P., Gomez-Rivas, E., Blum, P., 2013. Evaluation of Sampling Methods for Fracture Network Characterization Using Outcrops. AAPG Bulletin, 10.1306/02131312042 97, 1545–1566.

Zhang, K., Wu, W., Zhu, H., Zhang, L., Li, X., Zhang, H., 2020a. A modified method of discontinuity trace mapping using three-dimensional point clouds of rock mass surfaces. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 12, 571–586. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.10.006