

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



**ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA  
TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA  
STRUCTURE FROM MOTION PARA  
LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS  
GEOTÉCNICOS**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ramiro García Luna**

Licenciado en Geología

Madrid, 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos

**Doctorado en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y  
Materiales**

**ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA  
TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA  
STRUCTURE FROM MOTION PARA  
LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS  
GEOTÉCNICOS**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Ramiro García Luna**

Licenciado en Geología

Bajo la dirección de:

Dr. Rafael Jiménez Rodríguez

Dr. Salvador Senent Domínguez

Madrid, 2023

Título: ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LA TÉCNICA FOTOGRAMÉTRICA STRUCTURE FROM MOTION PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

Autor: Ramiro García Luna

Programa de Doctorado: Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales

Dirección de tesis:

Dr. Rafael Jiménez Rodríguez, Catedrático de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Dr. Salvador Senent Domínguez, Profesor Contratado Doctor, Universidad Politécnica de Madrid (Codirector)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por el:

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, dentro del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, Convocatoria 2015, mediante el Proyecto de Investigación PADSETU “Predicción y análisis de deformaciones para la seguridad en túneles” (ref. BIA 2015-69152-R).

Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante el Proyecto de Investigación TUTSS “Túneles urbanos para un transporte seguro y sostenible” (ref. PID2019-108060RB-100).

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del CDTI, dentro del Programa Estratégico CIEN, mediante el Proyecto PT0 “Investigación geológico-geotécnica de macizo rocoso”, dentro del Proyecto TUÑEL (ref. Expedientes 20150702 a 20150708).



*A mi compañera de vida, Sara*  
*A mis padres, Alfonso y Ana María*  
*A mi hermana, Andrea*



# Agradecimientos

Antes de iniciar con el documento de tesis, es necesario realizar una pequeña enumeración de aquellas personas que han ayudado a que esta tesis doctoral haya podido ser finalizada.

En primer lugar, agradecer a mis directores de tesis Rafael Jiménez y Salvador Senent su confianza, apoyo, y ayuda incondicional durante todo el tiempo de mi periodo como investigador.

A mis compañeros de laboratorio, pasados y presentes, que me han ayudado a hacer aún más llevadera mi estancia en el laboratorio.

A mi familia y amigos, por compartir los momentos buenos, y especialmente aquellos no tan buenos, que, con independencia de los trabajos desarrollados en esta tesis, ocurren con el paso natural de los años.

Muchas gracias a todos, sin vuestra ayuda esto nunca hubiera sido posible.



# Abstract

There are many techniques and devices on the market for the generation of 3D digital models, such as laser scanning (LiDAR) and Differential SAR interferometry (inSAR), however, their access is very limited due to their high price. In contrast, the economic limitations of photogrammetric techniques are almost non-existent. In particular, the Structure from Motion (SfM) technique does not require the use of special devices (e.g., photogrammetric cameras) for the generation of high-quality 3D models, similar to those achieved with other remote techniques. This technique uses only the digital information from the images themselves to model the photographed scene in a 3D point cloud. Thus, for the application of the SfM technique, the only device required is a conventional photographic camera and a computer software that applies this method.

In this doctoral thesis, this technique has been used to solve several geotechnical problems, with real application on site, developing work methodologies aimed to improve the control, monitoring and safety of construction works.

To do this, firstly, once the problem to be addressed has been identified, an Orientation Template (with several control points) was designed to help us scale and orient the 3D models. Likewise, in each of the cases, different aspects of the technique have been analysed, such as the number of images, the lighting conditions, the configuration of the device and the processing quality when generating the 3D models; with the aim of optimising its use under real application conditions. On the other hand, different capture strategies have been developed, which have allowed us to apply this technique regardless of the working scale: medium, short or long distance; and the application environment: underground, in the laboratory or in the field. In this document, these applications are presented in three different chapters, split according to the type of problem to be dealt with (Chapter 3, identification of discontinuity families in tunnels; Chapters 4 and 5, roughness analysis in rock surfaces) and the working distance used for their study (Chapter 4, short distance in the laboratory; Chapter 5, long distance on slopes). The results provided in the first application analysed (Chapter 3) have allowed us to determine that this technique is not limited for use in poorly lit underground environments, since, with the proposed methodology, SfM is able to improve the results obtained from manual methods. On the other hand, the applications shown in Chapters 4 and 5 have confirmed that this technique can analyse discontinuity surfaces with total precision, obtaining the JRC values of the analysed profiles from correlations (statistical and spectral), both in the laboratory and in the field for profiles with different measurements and orientations. In addition, the last chapter has shown that the implementation of different camera lens contributes to drastically increase the analysis distance without sacrificing a reduction in the quality of the 3D models generated.

Therefore, the conclusions drawn from the use of this technique in the different examples shown in this doctoral thesis have allowed us to determine that this technique represents an excellent, low-cost and easy-to-use alternative to traditional remote techniques for the acquisition and analysis of any physical aspect of interest in the field of civil engineering.

# Resumen

Existen multitud de técnicas y dispositivos en el mercado para la generación de modelos digitales 3D, como por ejemplo el láser escáner (LiDAR) y la interferometría SAR Diferencial (inSAR), sin embargo, su acceso se encuentra muy limitado por su elevado precio. Por el contrario, las limitaciones económicas que presentan las técnicas fotogramétricas son prácticamente nulas. En concreto, la técnica Structure from Motion (SfM) no requiere la utilización de dispositivos especiales (e.g., cámaras fotogramétricas) para la generación de modelos 3D de alta calidad, similares a los obtenidos con otras técnicas remotas. Esta técnica emplea únicamente la información digital, obtenida de las propias imágenes, para la modelización de la escena fotografiada en una nube de puntos 3D. De este modo, para la aplicación de la técnica SfM, el único dispositivo necesario es una cámara fotográfica convencional y un software informático que aplique este método.

En esta tesis doctoral, se ha empleado esta técnica para la resolución de varios problemas geotécnicos, con aplicación real en obra, desarrollando metodologías de trabajo orientadas a mejorar el control, seguimiento y seguridad de las obras de construcción.

Para ello, en primer lugar, una vez identificado el problema a tratar se ha diseñado una Plantilla de Orientación (con varios puntos de control) que nos servirá de ayuda a la hora de escalar y orientar los modelos 3D. Asimismo, en cada uno de los casos se han analizado diferentes aspectos propios de la técnica, como el número de imágenes, las condiciones de iluminación, la configuración del dispositivo y la calidad de procesamiento a la hora de generar los modelos 3D; con el objetivo de optimizar su uso bajo condiciones reales de aplicación. Por otro lado, se han desarrollado diferentes estrategias de captura, que nos han permitido la aplicación de esta técnica con independencia de la escala de trabajo empleada: media, corta o larga distancia; y el entorno de aplicación seleccionado: subterráneo, en laboratorio o en campo. En este documento, estas aplicaciones se presentan en tres capítulos diferentes, separadas en función del tipo de problema a tratar (Capítulo 3, identificación de familias de discontinuidad en túneles; Capítulos 4 y 5, análisis de la rugosidad en macizos rocosos) y de la distancia de trabajo empleada para su estudio (Capítulo 4, corta distancia en laboratorio; Capítulo 5, larga distancia en taludes). Los resultados proporcionados en la primera aplicación analizada (Capítulo 3) nos han permitido determinar que esta técnica no se encuentra limitada para su uso en ambientes subterráneos poco iluminados, puesto que, con la metodología propuesta, SfM es capaz de mejorar los resultados obtenidos a partir de métodos manuales. Por otro lado, las aplicaciones mostradas en los Capítulos 4 y 5 han permitido confirmar que esta técnica es capaz de analizar con total precisión las superficies de discontinuidad, obteniendo los valores JRC de los perfiles analizados a partir de correlaciones (estadísticas y espectrales), tanto en laboratorio como en campo, para perfiles de diferentes medidas y orientaciones.

De manera adicional, el último capítulo se ha demostrado que la implementación de diferentes objetivos a la hora de efectuar la adquisición de las imágenes contribuye a aumentar drásticamente la distancia de análisis sin renunciar a una reducción en la calidad de los modelos 3D generados.

Por lo tanto, las conclusiones adquiridas a partir del uso de esta técnica en los diferentes ejemplos mostrados en esta tesis doctoral nos han permitido determinar que esta técnica representa una excelente alternativa, de bajo coste y fácil utilización, a las técnicas remotas tradicionales para la adquisición y análisis de cualquier aspecto físico que resulte de interés dentro del campo de la ingeniería civil.

# Índice

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>v</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>vii</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>ix</i>
<i>Lista de Figuras</i> .....	<i>xiv</i>
<i>Lista de Tablas</i> .....	<i>xix</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i> .....	<i>xxi</i>
<b>1. Introducción y antecedentes</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivación de la investigación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo principal.....	1
1.2.2. Objetivos específicos .....	1
1.3. Metodología y plan de trabajo.....	2
1.4. Artículos publicados.....	3
<b>2. Estado del arte</b> .....	<b>5</b>
2.1. Introducción.....	5
2.2. Interferometría Sar Diferencial (inSAR).....	5
2.3. Láser escáner (LiDAR).....	6
2.4. Técnicas fotogramétricas .....	7
2.4.1. Fotogrametría clásica .....	7
2.4.2. Fotogrametría digital SfM (Structure from Motion) .....	9
<b>3. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real</b> .....	<b>13</b>
3.1. Introducción.....	13
3.2. Metodología SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real .....	15
3.3. Aplicación de la metodología SfM.....	16
3.3.1. Descripción de los túneles.....	16
3.3.2. Puntos de control .....	19
3.3.3. Adquisición de las imágenes.....	24
3.3.4. Caracterización manual de las familias .....	31
3.3.5. Generación de los modelos 3D .....	34
3.3.6. Edición de los modelos 3D para su uso en DSE.....	36

3.4. Resultados y discusión.....	40
3.4.1. Resultados del Túnel 1 .....	40
3.4.2. Resultados del Túnel 2 .....	46
3.4.3. Análisis del número de imágenes.....	51
<b>4. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance</b> .....	<b>55</b>
4.1. Introducción.....	55
4.2. Metodología SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance .....	57
4.3. Aplicación de la metodología SfM.....	58
4.3.1. Descripción de las muestras .....	58
4.3.2. Puntos de control .....	61
4.3.3. Adquisición de las imágenes .....	64
4.3.4. Caracterización manual de los perfiles de rugosidad.....	69
4.3.5. Generación de los modelos 3D .....	71
4.3.6. Extracción de los perfiles.....	72
4.4. Resultados y discusión.....	73
4.4.1. Análisis de la precisión de los perfiles.....	73
4.4.2. Estimación del JRC.....	76
4.4.3. Obtención del espectro de frecuencia de los perfiles .....	79
4.4.4. Parametrización del espectro de frecuencia .....	82
4.4.5. Análisis de clasificación.....	84
<b>5. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia</b> .....	<b>87</b>
5.1. Introducción.....	87
5.2. Metodología SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia .....	90
5.3. Aplicación de la metodología SfM.....	91
5.3.1. Descripción del talud .....	91
5.3.2. Puntos de control .....	93
5.3.3. Adquisición de las imágenes.....	97
5.3.4. Generación de los modelos 3D .....	101
5.3.5. Edición de los modelos 3D para la extracción de los perfiles.....	103
5.4. Resultados y discusión.....	104
5.4.1. Análisis de la precisión de los modelos .....	104
5.4.2. Estimación del JRC.....	107
5.4.3. Análisis de la longitud del perfil .....	112
5.4.4. Análisis del número de imágenes.....	113
<b>6. Conclusiones y líneas de investigación futuras</b> .....	<b>117</b>

6.1. Conclusiones.....	117
6.1.1. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real (Capítulo3)	118
6.1.2. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corta distancia (Capítulo4).....	119
6.1.3. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia (Capítulo5).....	120
6.2. Líneas de investigación futuras.....	121
<b>Referencias</b>	<b>123</b>

# Lista de Figuras

Figura 1. Principios de la fotogrametría: a) principio de haces; b) principio de colinearidad.....	8
Figura 2. Funcionamiento de la técnica SfM.....	11
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la identificación de las familias de discontinuidades en túneles empleando la técnica SfM.....	15
Figura 4. Localización de los túneles: a) Imagen satelital; b) Mapa geológico; c) Imagen de campo.....	16
Figura 5. Imágenes panorámicas de los túneles de estudio: a) Túnel 1; b) Túnel 2. ....	17
Figura 6. Vista exterior de las oficinas de la Fundación Santa Bárbara. ....	18
Figura 7. <i>Plantilla de Orientación Portátil</i> (García-Luna 2016).....	19
Figura 8. Definición de una escena 3D a partir de un plano auxiliar definido por 3 puntos: a) Escena 3D con escala y orientación; b) Plano vertical; c) Plano horizontal.....	20
Figura 9. Orientación y escalado de una escena 3D a partir de 5 puntos incluidos en un plano de dimensiones y orientación conocida: a) Escena 3D sin escala y orientación; b) Plano auxiliar; c) Escena 3D con escala y orientación.....	20
Figura 10. <i>Plantilla de Orientación Portátil 2.0</i> . ....	21
Figura 11. Ubicación de la Plantilla en el frente de excavación del Túnel 1: a) Detalle; b) General. ....	22
Figura 12. Distribución de los GCPs de validación (7) y ubicación de la Plantilla en el frente de excavación del Túnel 2. ....	23
Figura 13. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Sony $\alpha$ 230+18-55mm.....	24
Figura 14. Configuración del equipo fotográfico empleado para la adquisición de las imágenes en los túneles: a) Detalle Antorcha LED; b) Cámara + Soporte + Antorcha + Trípode. ....	25
Figura 15. Imagen de campo del Túnel 1: Condiciones iniciales de iluminación y posición de los focos. ....	26
Figura 16. Imagen de campo del Túnel 2: Jumbo de perforación empleado para iluminar el frente. ....	27

Figura 17. Imagen panorámica del frente de excavación del Túnel 2 donde es posible observar la secuencia de imágenes realizada desde cada posición “escaneando” el frente a partir de una serie encadenada de fotografías superpuestas (F1 – F9). .....	28
Figura 18. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías realizadas en Túnel 1.....	29
Figura 19. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías realizadas en el Túnel 2. ...	30
Figura 20. Trayectorias de desplazamiento de cámara: a) Túnel 1; b) Túnel 2.....	30
Figura 21. Caracterización manual de las familias de discontinuidades en el Túnel 2....	31
Figura 22. Proyección estereográfica polar de las orientaciones de los planos de discontinuidad medidos en campo (símbolos $\Delta$ ): a) Túnel 1; b) Túnel 2. Los valores de las familias principales (F1, F2 y F3) se muestran entre corchetes (en rojo) y los contornos (en color gris) representan las concentraciones de los polos calculadas a partir del método de distribución Fisher. ....	32
Figura 23. Región de Interés (ROI) del Túnel 2.....	37
Figura 24. Región de Interés (ROI) del Túnel 2 después de aplicar el sub-muestreo. ....	39
Figura 25. Diagrama de densidad de polos (vectores normales) en proyección estereográfica y polos principales identificados: F1 (227/82), F2 (137/78) y F3 (52/30) de entre todos los planos de discontinuidad presentes en el Túnel 1 (estrellas azules) calculados con DSE. También se proporcionan los resultados obtenidos mediante la caracterización manual con brújula (estrellas rojas), así como los posibles planos secundarios: F1A (244/85), F1B (251/76), F3A (226/11) y F3B (298/39). ....	40
Figura 26. Distribución espacial de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2 y F3) identificadas por DSE en el Túnel 1, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.....	43
Figura 27. Distribución espacial de los planos de discontinuidad sub-horizontales (F3, F3A y F3B) identificados por DSE en el Túnel 1, proyectados sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.....	44
Figura 28. a) Fotografía de campo de una región del Túnel 1 donde aflora la discontinuidad F1; b) Distribución espacial de los planos de discontinuidad F1, F1A y F3B identificados con DSE en el Túnel 1, proyectados sobre la nube de puntos correspondiente a la misma región. ....	45
Figura 29. Diagrama de densidad de polos (vectores normales) en proyección estereográfica y polos principales identificados en DSE: F1 (249/82), F2 (132/73) y F3 (352/19) de entre todos los planos de discontinuidad presentes en el Túnel 2 (estrellas azules) y resultados manuales (estrellas rojas). ....	46

Figura 30. Distribución espacial de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2 y F3) identificadas por DSE en el Túnel 2, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.....	48
Figura 31. Detalle de la zona superior del frente del Túnel 2 donde afloran varios bloques de roca: a) Modelo de detalle de la sección; b) Imagen ampliada de la distribución de los planos F1, F2 y F3 en esta región. (Notar que, la familia F2 (en verde) no aparece correctamente representada alrededor de los bloques.) .....	49
Figura 32. Distribución espacial fina, de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2A, F2B y F3) identificadas por DSE en el Túnel 2, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.....	50
Figura 33. Evolución, a medida que se reduce el número de fotografías utilizadas para construir el modelo fotogramétrico, de las diferencias angulares ( $\delta$ [°]) entre las orientaciones de las familias de discontinuidad extraídas con DSE de la nube de puntos de alta densidad y las calculadas con DIPS en base a las mediciones manuales con brújula: a) Túnel 1; b) Túnel 2. ....	52
Figura 34. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la rugosidad de en muestras de laboratorio empleando la técnica SfM a corta distancia. ...	57
Figura 35. Bloque de granito empleado para la adquisición de las muestras.....	58
Figura 36. Segmentación del bloque original. ....	59
Figura 37. Perfilado de las muestras.....	60
Figura 38. Diseño y dimensiones de la Plantilla 3.0 empleada en este estudio. ....	61
Figura 39. Configuración final de las muestras ensayadas.....	62
Figura 40. Muestra 1.....	63
Figura 41. Muestra 2.....	63
Figura 42. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Nikon D5200+18–55 mm.....	64
Figura 43. Set de fotografía macro empleado para la adquisición de las fotografías. ....	65
Figura 44. Posiciones de cámara (en rosa y azul) de las fotografías realizadas en la Muestra 1. (Los diferentes colores indican las diferentes distancias focales empleadas: rosa para las distancias mayores (22 mm) y azul para las inferiores (20 mm).) .....	66
Figura 45. Imagen de ejemplo de uno de los barridos (inferior) realizados en la Muestra 2: Distancia focal 26 mm; Apertura f/29. ....	68
Figura 46. Imagen de ejemplo de uno de los barridos (superior) realizados en la Muestra 2: Distancia focal 38 mm; Apertura f/32. ....	68

Figura 47. Imagen de la obtención de los perfiles manuales (transversales) adquiridos con el Peine de Barton en la Muestra 2. ....	69
Figura 48. Imagen de la obtención de los perfiles manuales (longitudinales) adquiridos con el Peine de Barton en la Muestra 2. ....	70
Figura 49. Imagen cenital de la Muestra 2 donde se muestra la ubicación de los 58 perfiles de rugosidad obtenidos con la ayuda de MATLAB. ....	72
Figura 50. Ejemplo de comparación visual entre perfiles: “perfiles de validación” <i>Prof29Muestra1</i> obtenidos a partir de métodos manuales (línea discontinua) y a partir de métodos digitales (línea continua). ....	73
Figura 51. Ejemplo de comparación visual entre perfiles: “perfiles de validación” <i>Prof54Muestra2</i> , obtenidos a partir de métodos manuales (línea discontinua) y a partir de métodos digitales (línea continua). ....	74
Figura 52. Valores JRC estimados a partir de correlaciones con el parámetro estadístico Z2 para todos los perfiles obtenidos de los modelos 3D: 58 (Muestra 1; cruces) + 58 (Muestra 2: rombos). ....	77
Figura 53. Resumen de los valores JRC (estimados visualmente por 14 personas diferentes) para los 16 “perfiles de validación” obtenidos en la Muestra 1. ....	78
Figura 54. Ejemplo de uno de los “Perfiles básicos” ( <i>Prof32Muestra1</i> ) obtenido de la Muestra 1. ....	79
Figura 55. Espectro de frecuencias correspondiente al perfil ( <i>Prof32Muestra1</i> ) mostrado en la Figura 54. ....	80
Figura 56. Espectros de frecuencia: a) Muestra 1 (Figura 50); b) Muestra 2 (Figura 51). ....	81
Figura 57. Matriz de confusión para el Ajuste EEc. ....	85
Figura 58. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la rugosidad de discontinuidades en taludes empleando la técnica SfM a larga distancia. .	90
Figura 59. Localización del talud: a) Imagen satelital; b) Mapa geológico; c) Imagen de campo. ....	91
Figura 60. Imagen de campo general de la Zona de Estudio y localización de las 4 Zonas de Análisis: A1, A2, A3 y A4. ....	92
Figura 61. Imagen de detalle de la Zona de Análisis A4, donde se muestra la ubicación de los GCPs. ....	93
Figura 62. Detalle del funcionamiento de la Plantilla de Orientación 4.0 empleando un plano horizontal como referencia a la hora de instalar la Plantilla sobre el macizo. ....	95

Figura 63. Imágenes en detalle de las 4 Zonas de Análisis (A1, A2, A3 y A4) donde se pueden observar los 32 GCPs Aislados (8 por zona) y los 16 GCPs incluidos en las 4 Plantillas de referencia (4 en cada una). .....	96
Figura 64. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Nikon D5200+55–200 mm.....	97
Figura 65. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías empleadas para la generación de los modelos G y T.....	99
Figura 66. Posiciones de cámara (en azul) para la generación del modelo de detalle (D) de la Zona de Análisis A1. ....	100
Figura 67. Comparación visual entre los perfiles extraídos de los modelos G y T, generados a 5, 10 y 15 m de distancia, y su perfil equivalente obtenido del modelo de detalle (D), para el <i>Prof3A1</i> incluido en la Zona de análisis A1.....	105
Figura 68. Ejemplo de los 3 sub-perfiles ( $L = 100\text{ mm}$ ) obtenidos a partir de la subdivisión del perfil original <i>Prof3A1</i> , generado a una distancia de 15 m, mostrado en la Figura 67. (Notar que, como la longitud total del perfil es ligeramente inferior a 300 mm ( $L = 280\text{ mm}$ ), existe un pequeño solapamiento entre los sub-tramos intermedio y final.).....	108
Figura 69. Comparación entre los valores JRC obtenidos de los modelos (G) y (T) y los obtenidos de los modelos de detalle (D) para los perfiles $L = 100\text{ mm}$ . ....	111
Figura 70. Evolución del coeficiente JRC en los sub-perfiles de la Zona de Análisis A3 al disminuir el número de imágenes empleadas en la generación de los modelos 3D: a) <i>Prof1A3</i> ; b) <i>Prof2A3</i> ; c) <i>Prof2A3</i> ; d) <i>Prof2A3</i> . ....	114

## Lista de Tablas

Tabla 1. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en los túneles.....	34
Tabla 2. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 5 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en los túneles.....	35
Tabla 3. Errores de distancia de las escalas de referencia verticales formadas por los GCPs de validación: (Real) medida con cinta métrica “in situ”; (Estimada) medida en el Modelo 3D. ....	35
Tabla 4. Superficie de las Regiones de Interés (ROIs) analizadas en DSE y comparación respecto a las superficies de los frentes y los Modelos 3D completos. ....	38
Tabla 5. Orientaciones representativas proporcionadas por DSE a partir del análisis de la Región de Interés (ROI) del Túnel 1.....	41
Tabla 6. Diferencias de orientación entre las familias principales identificadas por DIPS (a partir de las medidas manuales efectuadas con brújula) y las orientaciones representativas (principales) proporcionadas por DSE en la Región de Interés (ROI) del Túnel 1. ....	41
Tabla 7. Orientaciones representativas proporcionadas por DSE a partir del análisis de la Región de Interés (ROI) del Túnel 2.....	46
Tabla 8. Diferencias de orientación entre las familias principales identificadas por DIPS (a partir de las medidas manuales efectuadas con brújula) y las orientaciones representativas (principales) proporcionadas por DSE en la Región de Interés (ROI) del Túnel 2. ....	47
Tabla 9. Ajustes de cámara.....	67
Tabla 10. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en laboratorio.....	71
Tabla 11. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 36 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en laboratorio. ....	71
Tabla 12. Resultados de los análisis de clasificación para los diferentes ajustes propuestos. ....	85
Tabla 13. Modelos 3D generados en las Zonas de Análisis (A1 – A4): (D) Detalle, (G) General y (T) Teleobjetivo (el número de imágenes empleadas se indica entre paréntesis).....	98

Tabla 14. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis A1.....	101
Tabla 15. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 4 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis A1. ....	102
Tabla 16. Rugosidad media ( $Ra$ ) de los “Perfiles diferencia” $Prof1 - 4A1$ de los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis A1. ....	106
Tabla 17. Rugosidad media promedio ( $Ra$ ) de los “Perfiles diferencia” $Prof1 - 4An$ de los modelos 3D realizados en todas las Zonas de Análisis estudiadas (A1 – A4). ....	106
Tabla 18. Valores medios $JRC$ calculados para los 3 sub-perfiles ( $L = 100\text{ mm}$ ) en los que se ha subdividido cada uno de los perfiles analizados $Profi(i = 1..4)An$ (entre paréntesis se indican las diferencias medias $JRC$ respecto a los valores de referencia ( $D$ ) obtenidos de los modelos de detalle). ....	109
Tabla 19. Valores medios $JRC$ calculados para todos los perfiles de las Zonas de Análisis estudiadas (A1 – A4) en función de la longitud (entre paréntesis se indican las diferencias).....	112
Tabla 20. Tiempos de procesado para la generación de los nuevos sub-modelos ( $G$ y $T$ ) realizados en la Zona de Análisis A3 reduciendo el número de imágenes (entre paréntesis se indica el número defotografías empleado en cada caso). ....	115

# Abreviaturas y Acrónimos

SfM	Structure from Motion
DPC	Disperse Point Cloud
HDPC	High Density Point Cloud
GCP	Ground Control Point
ROI	Region of Interest



# 1. Introducción y antecedentes

## 1.1. Motivación de la investigación

El presente trabajo de investigación emplea la técnica fotogramétrica SfM. Esta técnica opera bajo los mismos principios que la fotogrametría estereoscópica convencional, basándose en el solapamiento entre una serie de imágenes para poder reproducir la escena fotografiada como una nube de puntos digital dentro de un espacio tridimensional. La principal ventaja que ofrece este método frente a la fotogrametría clásica es que permite reconstruir la geometría de la escena sin necesidad de introducir puntos de control asociados a coordenadas 3D conocidas. A pesar de su creciente difusión, los trabajos realizados hasta la fecha no analizan en profundidad el desempeño práctico de la misma, analizando factores como la posición de la cámara, el número de fotos o la optimización del proceso de restitución.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo principal

El objetivo general de la tesis es profundizar en el conocimiento de la técnica fotogramétrica SfM para la representación y caracterización de la realidad en el campo de la ingeniería civil, y particularmente en el campo de la geotecnia, desarrollando metodologías de trabajo orientadas a mejorar el control, seguimiento y seguridad de las obras de construcción.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se pretende:

- Desarrollar metodologías de trabajo que permitan la aplicación de la técnica SfM a diferentes escalas de trabajo.
- Analizar la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en la técnica (e.g., número de imágenes, posición de la cámara, configuración del dispositivo, iluminación, etc.) y optimizar el proceso de toma de datos.
- Desarrollar herramientas auxiliares de control que permitan el escalado y la orientación de los modelos 3D.

### 1.3. Metodología y plan de trabajo

El trabajo desarrollado por el investigador partirá de analizar los posibles usos de la técnica SfM dentro del campo de la ingeniería civil, desarrollando metodologías de trabajo que permitan su aplicación directa tanto en estudios a pequeña escala elaborados en laboratorio, como en casos prácticos realizados en campo.

En cada uno de los casos, una vez determinado el problema a analizar, se comenzará con la generación del modelo digital aplicando la técnica SfM. Luego, se analizará el modelo 3D de acuerdo con el problema en cuestión, junto a los diferentes factores que influyen en el propio proceso de creación de la nube. Finalmente, el rendimiento de la técnica será analizado –y optimizado– comparando sus resultados con los proporcionados por métodos de registro tradicionales (e.g., brújula, peine de Barton, perfilómetro, etc.).

Para ello, se ha decidido estructurar la presente tesis en diferentes capítulos en función de las diversas aplicaciones y/o problemáticas sobre las cuales se ha decidido emplear dicha técnica:

- Capítulo 2: Estado del arte, donde se presenta un resumen de las principales técnicas de teledetección remota existentes en el mercado, centrándonos en las técnicas fotogramétricas, y en concreto, en la técnica Structure from Motion (SfM), describiendo su funcionamiento y principales características.
- Capítulo 3: Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real.
- Capítulo 4: Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance.
- Capítulo 5: Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia.
- Capítulo 6: Conclusiones y líneas de investigación futuras derivadas de las investigaciones realizadas.

## 1.4. Artículos publicados

A continuación, se indican los artículos desarrollados durante la realización de la presente tesis doctoral, los cuales han sido parcialmente incluidos en el presente documento:

- García-Luna, R., Senent, S., Jurado-Piña, R., y Jiménez, R. (2019). Structure from Motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 262-273.
- García-Luna, R., Senent, S., Jurado-Piña, R., y Jiménez, R. (2019). Characterization of underground rock masses employing structure from motion: Application to a real case. In *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art* (pp. 826-835). CRC Press.
- García-Luna, R., Senent, S., y Jiménez, R. (2020). Characterization of joint roughness using spectral frequencies and photogrammetric techniques. *Boletín Geológico y Minero*, 131(3), 445-458.
- García-Luna, R., Senent, S., y Jiménez, R. (2021). Using telephoto lens to characterize rock surface roughness in SfM models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(5), 2369-2382.
- García-Luna, R., Senent, S., y Jiménez, R. (2020). Characterization of joint roughness using long-range terrestrial photogrammetry. In *ISRM EUROCK* (pp. ISRM-EUROCK-2020-034). ISRM.



## 2. Estado del arte

### 2.1. Introducción

La teledetección, también denominada detección remota, engloba a un conjunto de técnicas que permiten el análisis de un objeto, área o fenómeno sin que exista necesidad de contacto físico entre el sensor y la zona de estudio. En estas técnicas la información es extraída desde un lugar alejado de la escena donde se sitúa el dispositivo de medida, el cual puede estar instalado sobre la superficie terrestre, en plataformas aerotransportadas (aviones o drones) o en plataformas espaciales (satélites). Principalmente todas estas técnicas usan tecnologías de sensores para la adquisición de la información a partir del análisis de la radiación emitida o recibida por el dispositivo.

La presencia de estas técnicas en el siglo XXI es cada vez más notoria: su versatilidad, funcionalidad y eficiencia han abierto un amplio abanico de posibilidades en la investigación de diferentes métodos para la captura, el análisis y la gestión remota de la información. Su participación y desarrollo en el ámbito de la ingeniería ha aumentado sorprendentemente en las últimas décadas, incorporándose también su uso dentro del mundo de la mecánica de rocas. Algunos ejemplos en este sentido se encuentran en aplicaciones como la monitorización de laderas inestables (Fernández et al. 2014), la identificación de deslizamientos en carreteras (Galve et al. 2015) o la comparación de modelos digitales del terreno (Lorenzo et al. 2012).

Las técnicas de teledetección con mayor presencia en la actualidad en el campo de la mecánica de rocas son: la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR), el láser escáner (LiDAR) y la fotogrametría.

### 2.2. Interferometría SAR Diferencial (inSAR)

La interferometría de radar de apertura sintética, también denominada InSAR, es una técnica de teledetección que permite el análisis y el estudio de pequeñas variaciones en la superficie del terreno ( $< 1$  cm) a partir de la comparación de dos o más imágenes SAR adquiridas con un radar de apertura sintética (SAR: Synthetic Aperture Radar).

Los sistemas SAR son sistemas activos que emiten y reciben una señal radar en forma de microonda; registrando los cambios de fase en las ondas reflejadas por el objeto, la señal que es devuelta al sensor es analizada por el dispositivo y permite la generación de imágenes complejas de alta resolución espacial, denominadas imágenes SAR, donde cada

píxel de la imagen corresponde a un número complejo con un valor de amplitud y otro de fase ( $\phi$ ). La fase contiene información sobre la distancia recorrida por la señal y la amplitud guarda relación con el coeficiente de respuesta de la superficie del terreno a la señal, conocido como dispersión.

Los métodos de interferometría radar diferencial (InSAR) comparan dos o más imágenes SAR tomadas sobre la misma zona en fechas distintas. En el caso que existan variaciones de fase ( $\phi$  imagen 1  $\neq$   $\phi$  imagen 2) esto será producto de un desplazamiento, permitiendo detectar, de este modo, deformaciones y/o movimientos para el punto (píxel) estudiado de orden milimétrico.

La adquisición de imágenes SAR se puede realizar desde plataforma espacial (InSAR Satelital), aerotransportada o terrestre (GB-SAR: Ground-Based SAR).

### **2.3. Láser escáner (LiDAR)**

El LiDAR es un método de teledetección remota que permite la modelización de la superficie del terreno a través de la generación de nubes de puntos 3D de alta resolución ( $> 1$  cm). Los sistemas LiDAR son sistemas activos que proporcionan la distancia real entre el dispositivo y la superficie analizada, a partir del análisis de la señal emitida/recibida. El sensor emite un haz de luz que rebota sobre la superficie del terreno y regresa al dispositivo. El análisis del tiempo de vuelo empleado por el láser en recorrer este camino (láser de pulsos) o de su diferencia de fase con respecto a la señal original emitida (láser de medición de fase), permite medir la distancia a la que se encuentra el punto reflector.

En los sistemas LiDAR el sensor (emisor/receptor) se instala sobre un elemento de barrido denominado “Scan”, que modifica constantemente los ángulos vertical ( $\theta$ ) y horizontal del haz de luz. El objetivo es analizar la escena desde varios puntos de vista y combinar los diferentes escaneos para generar el modelo final. El LiDAR proporciona modelos 3D, formados por una nube de millones de puntos que reproducen la superficie del terreno. Cada uno de estos puntos contiene información sobre su situación espacial (X, Y, Z), la intensidad de la señal reflejada (I) y el color verdadero (RGB).

Los sensores pueden estar instalados sobre plataforma aerotransportada (LiDAR aéreo “Airbone LiDAR”) o directamente colocados sobre la superficie del terreno (Láser scanner terrestre “Terrestrial Laser Scanner, TLS”). El LiDAR también puede operar sobre plataformas móviles como coches (“car-borne LiDAR”), trenes (“train-borne LiDAR”) o barcos (“boat-based LiDAR”).

## 2.4. Técnicas fotogramétricas

La Fotogrametría es una técnica remota que permite estudiar y definir con precisión: (i) la forma, (ii) dimensión y (iii) posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando únicamente medidas realizadas sobre una o varias fotografías de este objeto (Bonneval, 1972). Los sistemas de fotogrametría digital son sistemas de teledetección pasivos que registran únicamente la energía electromagnética radiante; a diferencia de los sistemas activos que emiten radiación, las cámaras fotográficas son únicamente dispositivos receptores que registran la luz natural que irradia de un objeto. De este modo, la información es extraída desde un lugar apartado de la escena donde se sitúa el dispositivo de medida (cámara fotográfica). La captura de imágenes para fotogrametría se puede realizar sobre plataforma terrestre o aerotransportada (drones, aviones, satélites, etc.), en función del vehículo que transporte la cámara.

### 2.4.1. Fotogrametría clásica

Una imagen proporciona información bidimensional sobre la geometría de un objeto. Al trabajar con dos fotos, es posible analizar los puntos comunes de las zonas de solape y obtener visión estereoscópica. La fotogrametría permite adquirir información tridimensional a través de los puntos comunes presentes en un par de imágenes sucesivas. La fotogrametría estereoscópica convencional permite la generación de modelos 3D de alta resolución (fotogrametría aérea 1 m – dm; terrestre < 1 cm) a partir de la combinación de 2 fotografías tomadas sobre la misma zona. Estas imágenes han de ser tomadas con dispositivos especiales de alta calidad geométrica (cámaras métricas) cuyas dimensiones y características ópticas son conocidas a la perfección. Para determinar la forma, dimensiones y posición real en el espacio del objeto de nuestro estudio, es necesario el establecimiento previo de una serie de puntos de control (de coordenadas espaciales conocidas) o conocer la posición 3D de la cámara.

Para la creación de un modelo 3D es necesario contar con dos fotografías tomadas desde dos puntos de vista diferentes. A partir de la reconstrucción de la forma y la situación (respecto a un sistema de referencia) de cada uno de los haces que componen la imagen, usando el principio de visión estereoscópica, la técnica es capaz de identificar los rayos homólogos de cada haz y determinar las coordenadas espaciales (x, y, z) de cada punto. El proceso que permite pasar de la información bidimensional (proporcionada por la fotografía) a la información tridimensional (nube de puntos 3D) que se obtiene con la fotogrametría, se denomina restitución.

Los principios en los que se basa la fotogrametría son: (i) el principio de colinealidad y (ii) el principio de haces o de triangulación fotogramétrica (Figura 1).

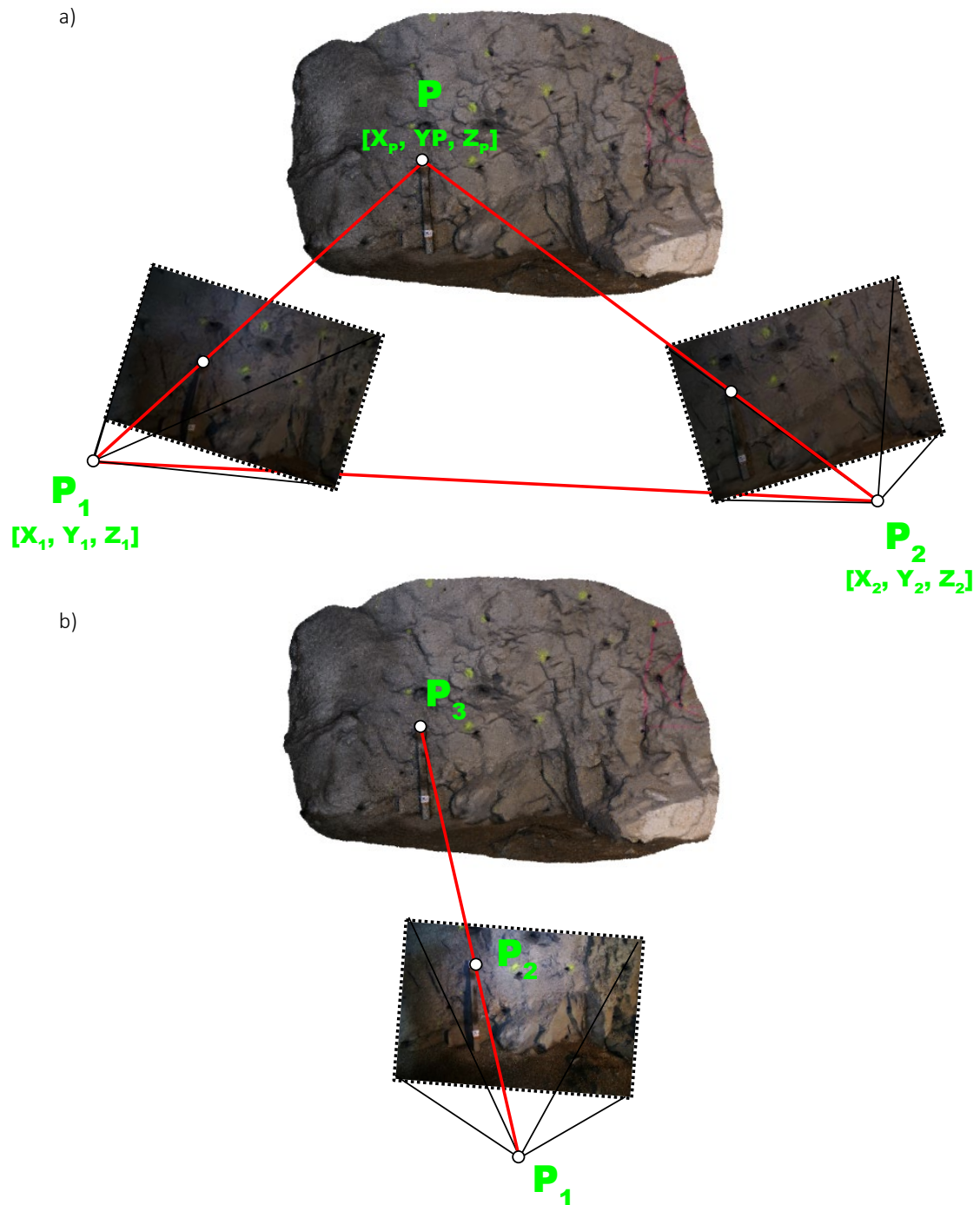


Figura 1. Principios de la fotogrametría: a) principio de haces; b) principio de colinealidad.

El principio de colinealidad sostiene que el centro de proyección de la cámara, el punto de la imagen y el punto del objeto se encuentran alineados (Figura 1b). Por su parte, el principio de haces o de triangulación fotogramétrica enuncia que las coordenadas de los puntos homólogos –medidas en imágenes diferentes– pueden ser usadas simultáneamente para calcular sus coordenadas 3D intersecando haces colineales (Figura 1a). Los puntos comunes en las zonas de superposición de imágenes cumplirán ambos principios simultáneamente.

## 2.4.2. Fotogrametría digital SfM (Structure from Motion)

La presente tesis doctoral se centra en un procedimiento de fotogrametría digital que ha tenido un inmenso desarrollo en los últimos años, consolidándose como una excelente alternativa a los métodos tradicionales, la técnica Structure from Motion (SfM). Esta técnica es capaz de realizar, con una inversión mínima, reconstrucciones topográficas (MDT – MDE) y modelos 3D de muy alta resolución (nubes de puntos), similares a los obtenidos con otras técnicas mucho más costosas (InSAR, 3D, LiDAR o técnicas sintéticas: altimetría, planimetría, etc.). SfM opera bajo los mismos principios que la fotogrametría estereoscópica convencional, basándose en el solapamiento entre una serie de imágenes para poder reproducir la escena fotografiada como una nube de puntos dentro de un espacio tridimensional.

La principal ventaja que ofrece esta técnica frente a los métodos tradicionales es que es capaz de resolver directamente el proceso de restitución, sin la necesidad de incorporar al modelo puntos de control de coordenadas 3D conocidas.

Como su propio nombre indica “Structure from Motion”, esta técnica consigue la modelización 3D de estructuras a partir del movimiento relativo del sensor con respecto al objeto. De este modo, su éxito radica en capturar el objeto de estudio desde el mayor número de ubicaciones posibles. El observador debe desplazarse a lo largo de la escena, variando la posición y orientación de la cámara en cada toma. La idea final es realizar una reconstrucción 3D de la escena usando únicamente la información proporcionada por sus imágenes, por lo tanto, la calidad y precisión del modelo está muy ligada a las características propias de las mismas.

## Origen

El desarrollo de la técnica SfM tiene su inicio en la década de los 90 donde desempeñaba un papel muy alejado al actual. Su origen está asociado al campo de la visión artificial y la creación de algoritmos de correlación automática de imágenes (CAI). No es hasta 2006 – 2008 con la aparición de los primeros programas de procesamiento de nubes, cuando la técnica adquiere un nuevo enfoque y empieza su aplicación dentro del escaneado 3D a partir de fotografía.

Un ejemplo es el programa “Photosynth” lanzado al mercado el 20 de agosto de 2008. Este software fue uno de los primeros en conceder al usuario la posibilidad de crear sus propios modelos 3D. Photosynth fue comercializado por la compañía Microsoft y está basado en “Photo Tourism” un proyecto de tesis desarrollado en 2006 por Noah Snavely, licenciado en la Universidad de Washington (Snavely et al. 2008).

Sin embargo, su aplicación asociada al mundo de la geotecnia y al de las ciencias de la tierra en general ha sido muy escasa hasta los últimos años (Niethammer et al. 2012), donde ha experimentado un inmenso desarrollo de forma exponencial, acompañado de la proliferación de nuevos artículos y trabajos que incorporan esta técnica en sus análisis.

Por ejemplo, haciendo referencia a la accesibilidad y disponibilidad de esta técnica, el equipo de Micheletti de la universidad de Lausanne centro su estudio en la aplicación de técnicas SfM con herramientas gratuitas e imágenes capturadas con smartphones (Micheletti et al. 2015), mientras que en otra publicación el equipo de Westoby de la universidad de Aberystwyth muestra la ventaja económica que representa SfM frente a otras técnicas (Westoby et al. 2012).

Finalmente, la utilización de las técnicas SfM para el estudio de la erosión hídrica (Balaguer Puig 2015) o la caracterización geomecánica (Riquelme 2015) se encuentran entre las aplicaciones más recientes, figurando en publicaciones de investigadores nacionales.

## Diferencias con la fotogrametría clásica

Las técnicas tradicionales de fotogrametría digital necesitan conocer con precisión la localización y orientación exacta que adquiere la cámara para la captura de cada una de las imágenes. Esta información es usada para poder determinar la ubicación tridimensional de los puntos de la nube en el modelo. Para poder manejar esta información es necesario disponer de dispositivos fotográficos muy sofisticados equipados con brújula digital y sistema de posicionamiento GPS.

Aunque hoy en día la opción de localización GPS suele estar incorporada, por defecto, en la mayoría de los dispositivos digitales, los valores proporcionados por los mismos aún están muy lejos de conseguir la calidad necesaria para su utilización como “dato” en la generación de modelos digitales de alta precisión.

De igual modo también es posible estimar la posición de la cámara mediante el uso de puntos de referencia auxiliares, aplicando los principios básicos de la triangulación.

La principal ventaja que ofrece la técnica SfM frente a la fotogrametría clásica es que permite reconstruir la geometría de la escena, sin necesidad de introducir puntos de control asociados a coordenadas 3D conocidas. Tampoco es indispensable determinar la orientación y la situación espacial exacta de la cámara en cada una de las tomas, puesto que esta información es extraída a partir del propio análisis del conjunto de datos.

## Funcionamiento

La técnica SfM busca y encaja, de forma automática, puntos que presentan características comunes entre sí, dentro de una serie de fotografías (Figura 2). Esta etapa inicial se denomina fase de correlación y compara una a una todas las imágenes introducidas en el modelo buscando puntos homólogos entre ellas. Esta información es compartida y ejecutada, de manera simultánea, por la fase de orientación para obtener las posiciones de la cámara. Las ecuaciones de colinealidad son resueltas sin necesidad de introducir ningún dato de referencia que sirva de apoyo a la hora de aplicar los principios de triangulación fotogramétrica. Su solución es proporcionada directamente a través del alto número de puntos analizados durante la fase de correlación.

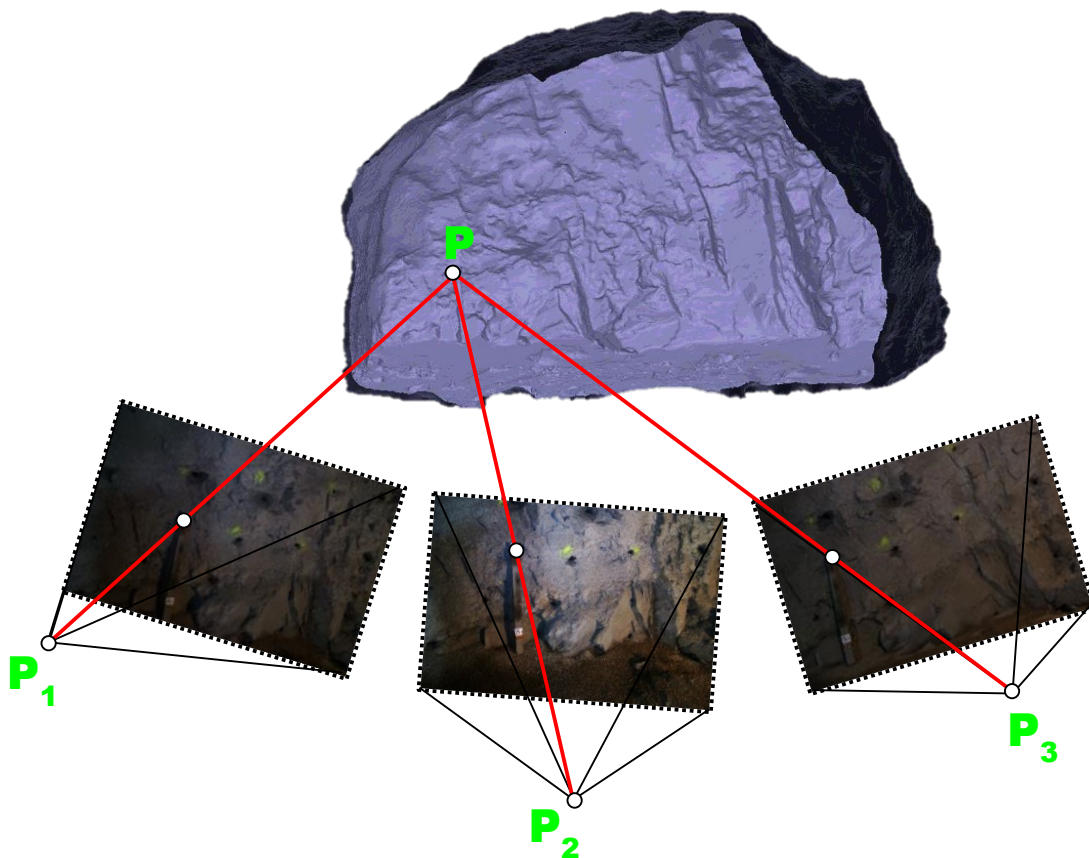


Figura 2. Funcionamiento de la técnica SfM.

De este modo la técnica SfM es capaz de determinar la orientación y situación espacial que adopta la cámara en cada fotografía, a partir del análisis de sus propias características en común. En contraste con la fotogrametría tradicional, el resultado es una nube de puntos, sin escala ni orientación, situada dentro de un sistema de referencia arbitrario. No obstante, a pesar de la falta de referencias, la generación del modelo, su registro y visualización 3D puede proporcionarnos información suficiente para la realización de un primer análisis espacial.

## Puntos de control: Escalado y orientación del modelo

Como se ha indicado anteriormente la principal diferencia de la técnica SfM frente a la fotogrametría tradicional es la posibilidad de generar modelos 3D sin la necesidad de puntos de control asociados a coordenadas espaciales conocidas. Sin embargo, la gran mayoría de aplicaciones de esta técnica dentro del mundo de la mecánica de rocas requiere modelos 3D capaces de reproducir la realidad con el mayor grado de exactitud. De este modo, la georreferenciación del objeto de estudio dentro de un sistema de referencia conocido (local o general) resulta, en la mayoría de los casos necesaria.

Para el escalado y orientación del modelo es indispensable la presencia de puntos de control (GCPs), de coordenadas 3D conocidas, que sirvan como elementos de referencia a la hora de aplicar la transformación (escalado de la nube de puntos mediante rotación y translación en los 3 ejes). La expresión gráfica de un punto de control dentro de una imagen corresponde simplemente con un píxel determinado, de coordenadas conocidas, asociadas a un sistema de referencia local o global. Estos puntos pueden estar situados sobre el propio objeto de estudio o distribuidos aleatoriamente a lo largo de la escena.

En el caso de no disponer de GCPs, es posible el uso de elementos de la propia escena como puntos de referencia. Cualquier singularidad o traza que presente algún distintivo en sus características y sea fácilmente reconocible en las diferentes imágenes, puede servir para este propósito (Dowling et al. 2009; Dandois y Ellis 2010). En cuanto al número de puntos de control necesarios, se recomienda por lo general el uso de mínimo tres puntos de referencia, a partir de ahí, cuantos más mejor. Su utilización contribuye, en gran medida, a mejorar la densidad, calidad y precisión del modelo final; ayudando de igual modo a reducir la incertidumbre ligada al proceso de transformación, sobre todo si no disponemos de un segundo modelo de comparación.

## Limitaciones

La principal limitación que presenta la técnica fotogramétrica SfM es que la calidad de los resultados está directamente relacionada con la calidad de los datos de partida –utilizados para la generación del modelo–. Al igual que sucede con otras técnicas fotogramétricas, los posibles errores cometidos en cada una de las distintas etapas de la reconstrucción 3D se reproducen, paso a paso, hasta afectar al modelo final. Por lo tanto, el uso de imágenes desenfocadas o con baja resolución puede dar lugar a complicaciones en la fase de correlación y búsqueda de puntos homólogos. Una reducción en el número de puntos comunes detectados se traduce en una mayor incertidumbre en la etapa de orientación de las imágenes.

## **3. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real**

### **3.1. Introducción**

Un factor crucial en el diseño y construcción de túneles en macizos rocosos son las discontinuidades, puesto que pueden modificar las cargas impuestas al soporte y provocar la formación de cuñas inestables que caigan al interior del túnel (Hammet y Hoek 1981; Karzulovic 1988). Es por ello, que resulta de capital importancia una buena identificación de las familias de discontinuidades, determinando su orientación y buzamiento, de tal forma que se pueda llevar a cabo un análisis de bloques realista (Shi y Goodman 1989; Jiménez-Rodríguez y Sitar 2006a, 2006b).

Debido a que durante la excavación de un túnel únicamente es visible la roca en el frente de excavación, es ahí donde se debe realizar la identificación de las familias de discontinuidades del macizo. Esta caracterización se hace, de manera habitual, con brújula, lo cual conlleva varias dificultades. En primer lugar, supone un riesgo para el operario que realiza la toma de datos, puesto que ha de trabajar en la zona del túnel con mayor riesgo de colapso y que todavía no ha sido sostenida (Slama et al. 1980; Health y Safety Executive 1996). Además, representa una interferencia en el proceso de excavación y la necesidad de hacerlo en un tiempo reducido puede conducir a tomar un número escaso de datos o a no inspeccionar la totalidad del frente. Enlazado con lo anterior, la toma de datos manual presenta la dificultad de caracterizar las zonas altas de la sección, donde únicamente se podría acceder con medios auxiliares. Por último, la toma de datos con brújula depende de la pericia del operario y pueden producirse errores en el posicionamiento y la lectura de la brújula (Van Knapen y Slob 2006).

Debido a estas dificultades, cada vez es más frecuente la caracterización de las familias de discontinuidades mediante técnicas a distancia, como la fotogrametría y el láser escáner. Estas técnicas se han aplicado profusamente en la caracterización del macizo rocoso en superficie (e.g., Gigli y Casagli 2011) y ya son habituales en el campo de los túneles. Por ejemplo, Wang et al. (2013) emplean fotogrametría clásica para obtener las familias de discontinuidades y, con esa información, llevan a cabo un análisis de estabilidad de cuñas basado en la teoría de bloques y el equilibrio límite. Igualmente, Zhu et al. (2016)

identifican las discontinuidades mediante fotogrametría clásica y analizan la estabilidad estructural mediante un “discontinuous deformation analysis” (DDA). Como ejemplo de los trabajos que emplean láser escáner en campo de los túneles se puede citar a Fekete et al. (2010). Estos autores emplean el láser escáner para diferentes tareas, como comparar la superficie de excavación y el contorno final del túnel (y obtener así, entre otras informaciones, el espesor de hormigón realmente colocado) o para construir un modelo del macizo con las familias de discontinuidades.

Respecto al uso de la técnica Structure from Motion ya son varios los trabajos que han empleado SfM para obtener modelos digitales del contorno interior del túnel (e.g., Roncella et al. 2012; Chaiyasarn et al. 2015). Sin embargo, todavía son muy limitados los estudios sobre el empleo de esta técnica para la caracterización de las discontinuidades en frentes de excavación. Se deben destacar los trabajos de Buyer y Schubert (2016, 2017). En el primero de ellos emplean SfM para identificar las familias de discontinuidades mientras que en el segundo se centran en determinar los parámetros de espaciado y persistencia. Aunque ambos trabajos muestran las posibilidades del SfM, no analizan en profundidad el desempeño de esta técnica ni factores como la posición de la cámara, el número de fotos o la optimización del proceso de restitución.

En este capítulo se presenta una aplicación de la técnica SfM para la identificación de las familias de discontinuidades de un macizo rocoso en el interior del túnel. El trabajo emplea el software Agisoft Metashape (Agisoft) para la aplicación de la técnica SfM y el software de código abierto DSE (Discontinuity Set Extractor) para la determinación de los planos de discontinuidad y su agrupación en familias. La metodología propuesta se aplica al caso concreto de dos túneles en construcción en el Norte de España, comparando los resultados obtenidos mediante la técnica SfM con datos manuales adquiridos con brújula, realizando un análisis en detalle de varios de los factores que intervienen en el proceso, así como de posibles alternativas para optimizar la metodología y hacerla compatible con los requisitos de un túnel en construcción.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

### 3.2. Metodología SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

La Figura 3 presenta un diagrama de flujo de la metodología seguida en este capítulo para identificar y caracterizar familias de discontinuidades en excavaciones subterráneas utilizando fotografías del frente de excavación del túnel. Como se muestra, el flujo de trabajo se divide en cinco pasos principales: (i) adquisición de las fotografías, (ii) generación de las nubes de puntos 3D, (iii) edición y visualización del modelo 3D, (iv) extracción de las discontinuidades y (v) validación de los resultados. En las siguientes secciones se mostrará información detallada sobre cada uno de estos pasos.

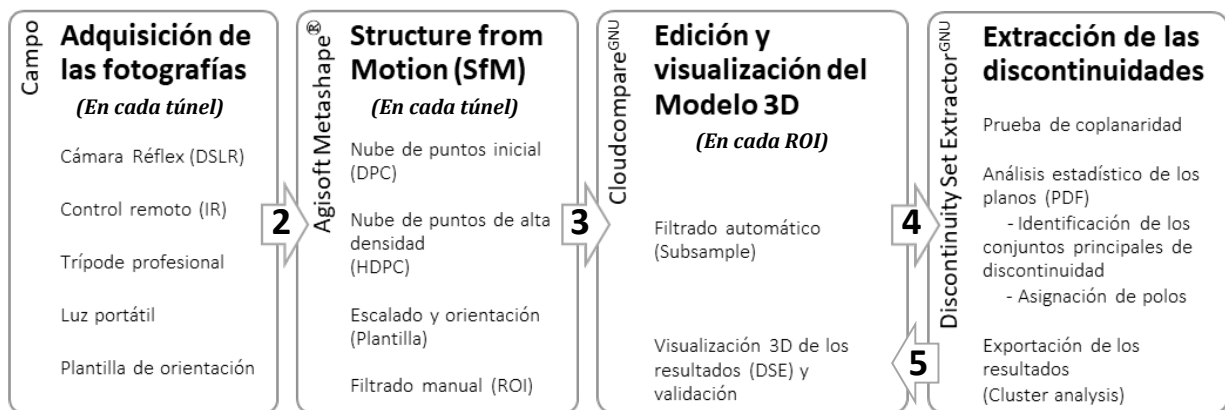


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la identificación de las familias de discontinuidades en túneles empleando la técnica SfM.

### 3.3. Aplicación de la metodología SfM

#### 3.3.1. Descripción de los túneles

Los túneles seleccionados para realizar el estudio (Figura 4) se encuentran localizados en la Comarca del Bierzo, próximos a la localidad de La Ribera de Folgoso (León), en el norte de España (coordenadas UTM (WGS84) 29N,  $X: 717357,372$  m,  $Y: 4720251,211$  m). El macizo rocoso atravesado por los túneles está constituido por una serie sedimentaria donde afloran principalmente areniscas, pizarras y capas de carbón, pertenecientes a la Cuenca carbonífera del Bierzo y Villablino (edad Estefaniense, Carbonífero superior) [Para una descripción geológica más detallada de la zona acudir a GEODE-Z1100 (González Menéndez et al. 2008)].

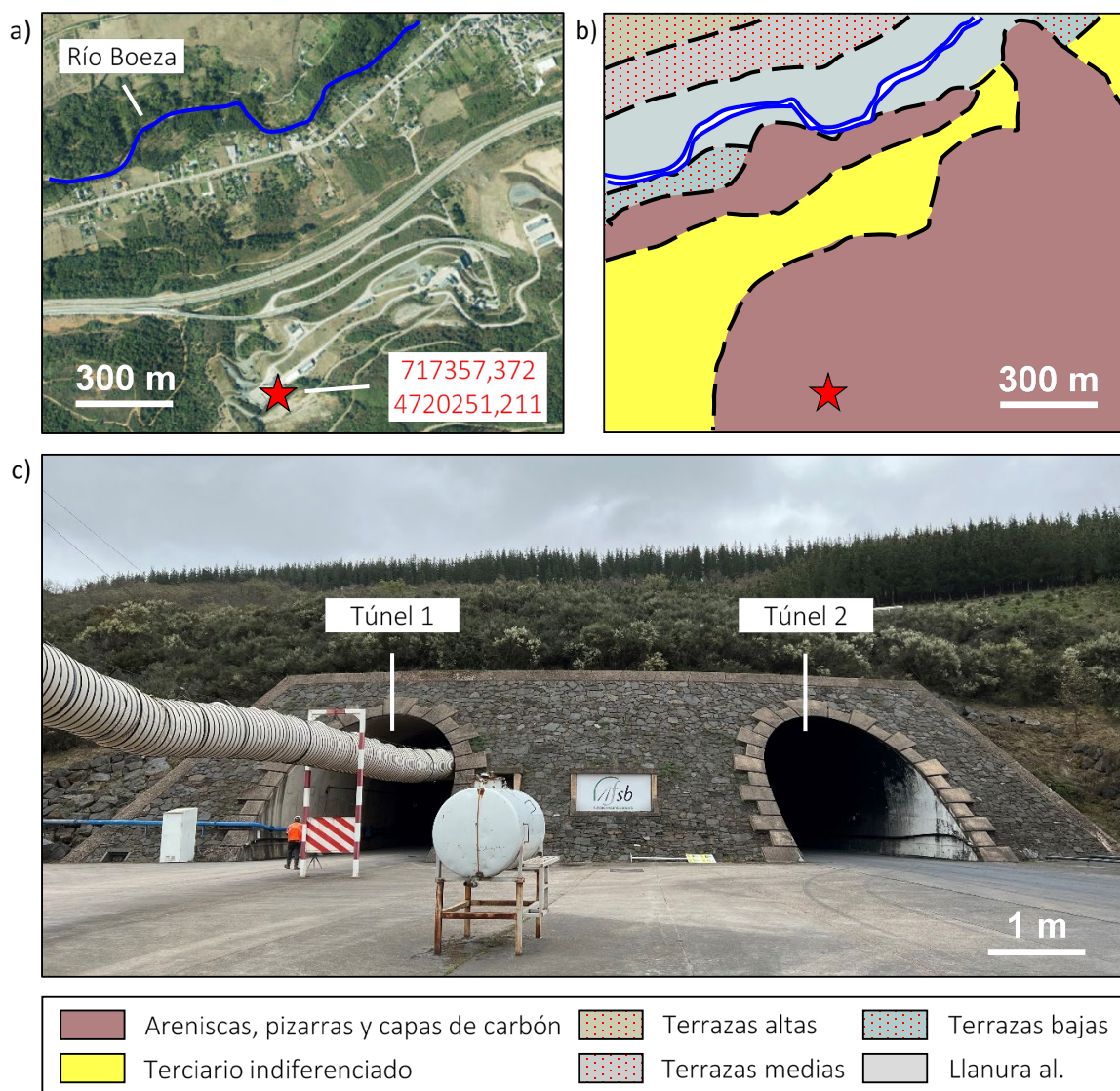
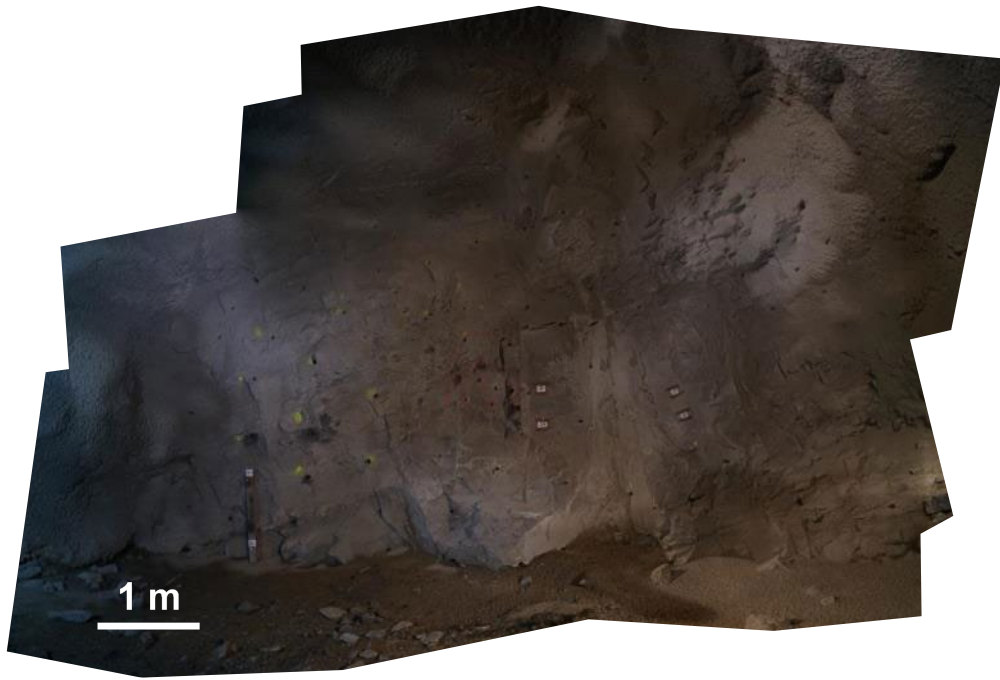


Figura 4. Localización de los túneles: a) Imagen satelital; b) Mapa geológico; c) Imagen de campo.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Los túneles, denominados en lo que sigue como Túnel 1 y Túnel 2, tienen una sección de excavación de  $44 \text{ m}^2$  y  $60 \text{ m}^2$  respectivamente y se ejecutan en avance y destroza (Túnel 1, Figura 5a) y a sección completa (Túnel 2, Figura 5b), contando, a la fecha de realización de este estudio, con unas longitudes ejecutadas de  $480 \text{ m}$  y  $295 \text{ m}$  respectivamente. Asimismo, en el momento de la visita, los frentes de ambos túneles estaban atravesando unos macizos rocosos constituidos por lutitas, limolitas y areniscas, con una calidad “media” en términos de Rock Mass Rating (RMR entre 40 y 60).

a)



b)

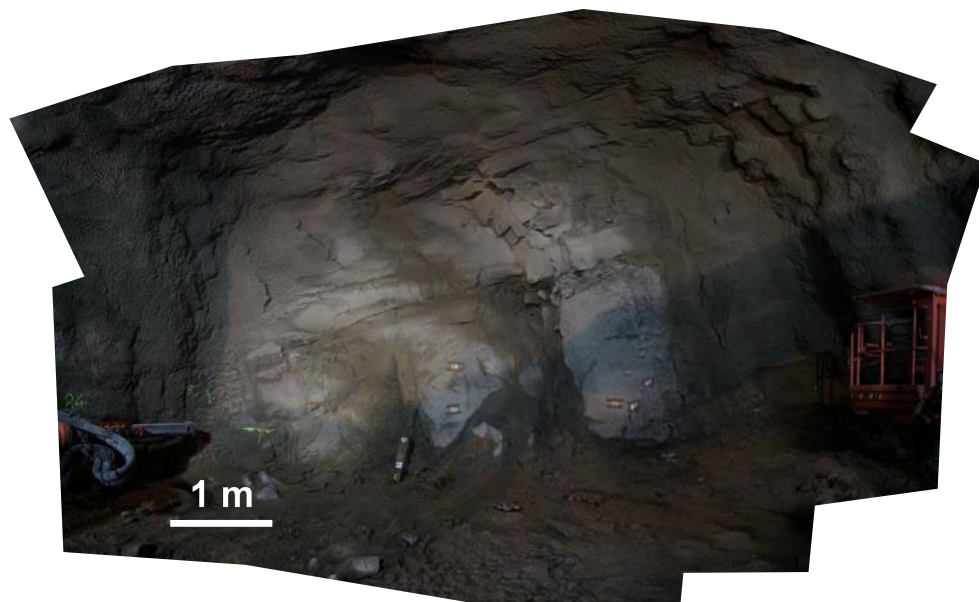


Figura 5. Imágenes panorámicas de los túneles de estudio: a) Túnel 1; b) Túnel 2.

Ambos túneles pertenecen a la Fundación Santa Bárbara (Figura 6), una fundación cultural pública y de carácter no lucrativo adscrita a la Consejería de Economía y Hacienda de la Junta de Castilla y León, a través de la Dirección General de Energía y Minas, la cual se dedica principalmente a la formación y capacitación de nuevos trabajadores en el ámbito de la construcción subterránea; con gran aplicación en todo el campo de la ingeniería civil, así como en otros sectores relacionados como el de la minería, las energías renovables, la protección civil y la seguridad laboral.



Figura 6. Vista exterior de las oficinas de la Fundación Santa Bárbara.

A su vez, la Fundación Santa Bárbara también ofrece la infraestructura de sus instalaciones y su equipo de profesionales para el desarrollo de proyectos de investigación de base tecnológica y de I+D+i, colaborando con universidades, organismos de investigación y empresas (FSB, 2017).

Debido a que se trata de túneles destinados a la docencia y la investigación, no se ven sometidos a los ritmos de ejecución propios de la obra pública, por lo tanto, esto nos ha permitido la realización de una campaña de campo de “amplio espectro” que nos ayudará a ajustar, optimizar y adaptar nuestra metodología a los requisitos “reales” de un túnel en construcción.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

### 3.3.2. Puntos de control

En contraste con la fotogrametría clásica, la técnica SfM genera una nube de puntos, sin escala ni orientación, dentro de un sistema de referencia arbitrario. Por lo tanto, si el objetivo del presente estudio es realizar una caracterización geomecánica de los frentes de excavación de los Túneles 1 y 2 (análisis de discontinuidades) a partir de sus reconstrucciones 3D, es imprescindible que los modelos generados representen fielmente la geometría, escala y orientación real del objeto de estudio. De este modo, será necesario recurrir a la incorporación dentro de la escena de varios puntos de control (GCPs) de coordenadas (x, y, z) conocidas, que serán empleados para: (i) escalar, (ii) orientar y (iii) validar los modelos 3D.

Para resolver los dos primeros objetivos, se ha recurrido a la utilización de una “*Plantilla de Orientación Portátil*”; una herramienta auxiliar que permite al usuario, en un único paso, orientar y escalar la escena –de manera rápida y sencilla– sin necesidad de recurrir a dispositivos de control topográfico adicionales (e.g., Estación total o GPS diferencial). Esta Plantilla (Figura 7) es una idea original desarrollada por el doctorando durante la realización de su Trabajo Fin de Máster en el CEDEX (García-Luna, 2016) y su funcionamiento ha servido de base para el desarrollo de la presente tesis doctoral, adaptando y evolucionando su diseño en función de los diferentes objetivos planteados en esta investigación.

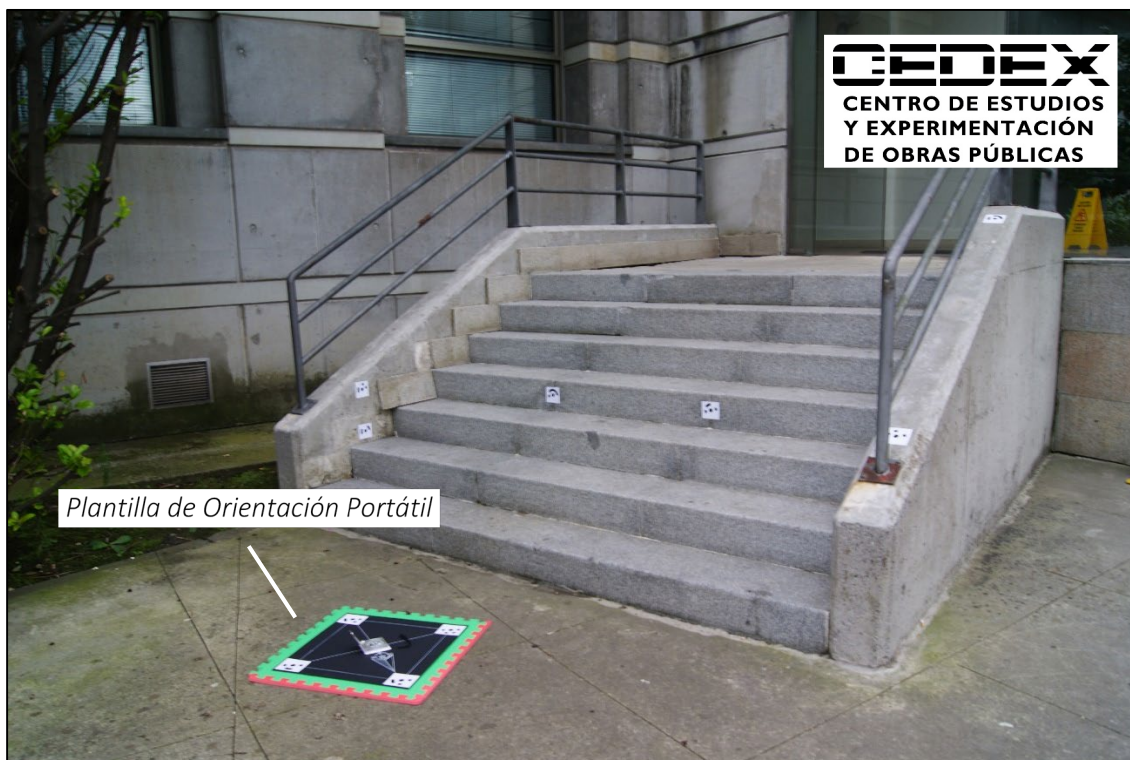


Figura 7. *Plantilla de Orientación Portátil* (García-Luna, 2016).

El funcionamiento de la *Plantilla de Orientación Portátil* se basa en la idea de que al conocer la geometría y orientación (respecto al norte) de un determinado plano incluido en la escena, es posible emplear su información tridimensional como sistema de referencia y orientar el resto del modelo a partir de este. Solamente es necesario conocer la posición de tres puntos de este plano, elegir uno como origen del sistema  $(0, 0, 0)$  y determinar las coordenadas relativas que presentan los otros dos respecto al origen  $(N_x, N_y, N_z)$ . La forma más sencilla de demostrar este principio es aplicándolo a planos verticales o horizontales, donde la obtención de las coordenadas relativas es mucho más directa (Figura 8).

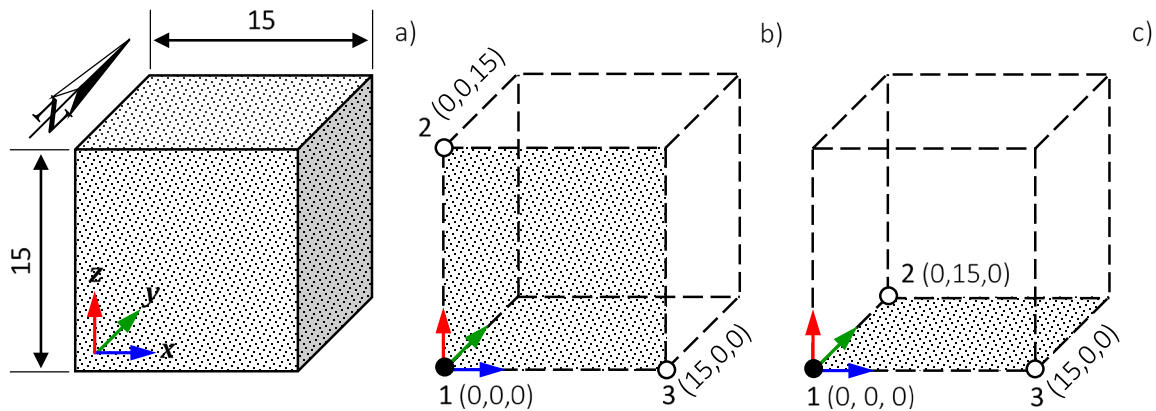


Figura 8. Definición de una escena 3D a partir de un plano auxiliar definido por 3 puntos: a) Escena 3D con escala y orientación; b) Plano vertical; c) Plano horizontal.

De este modo, la idea principal de la Plantilla es introducir un plano sintético dentro de la escena, caracterizarlo y usarlo como sistema de referencia para orientar y escalar el modelo 3D dentro de su contexto real (Figura 9).

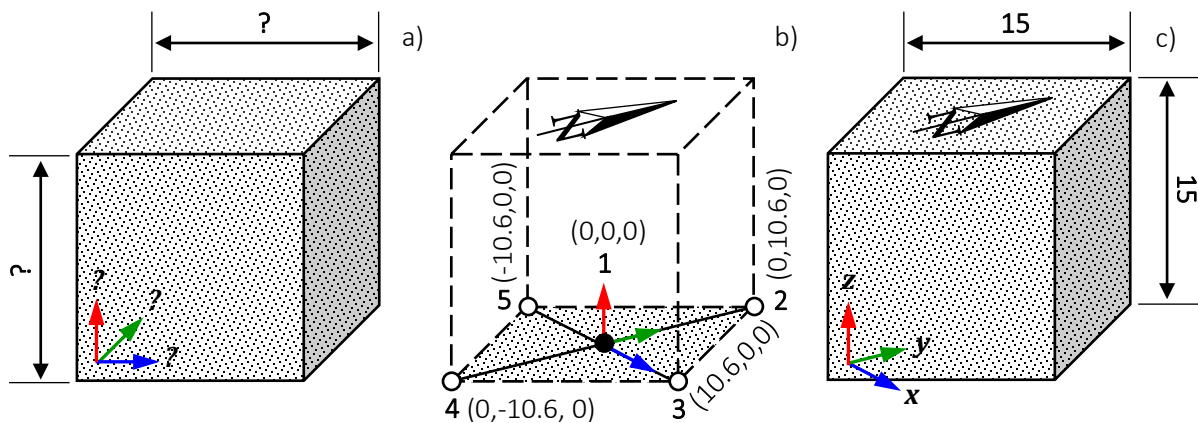


Figura 9. Orientación y escalado de una escena 3D a partir de 5 puntos incluidos en un plano de dimensiones y orientación conocida: a) Escena 3D sin escala y orientación; b) Plano auxiliar; c) Escena 3D con escala y orientación.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Para ello, el origen del sistema de coordenadas (1) se sitúa en el centro de la Plantilla y sus 4 puntos (2, 3, 4 y 5) nos ayudan a definir los ejes cardinales (N-S, E-O). El diseño simula una rosa de los vientos, donde cada punto marca una dirección (N, S, E y O) dentro de un sistema de referencia cartesiano.

De este modo, si hacemos coincidir los ejes de la Plantilla con la orientación real que presentan estos en la propia escena (N-S, E-O respecto al norte geográfico) y conocemos las relaciones geométricas entre sus puntos (las dimensiones de la plantilla son conocidas), es posible referenciar la escena dentro de un sistema cartesiano local, respetando su orientación “in situ”. Para ello, solamente tendremos que asegurar que la Plantilla se encuentre nivelada (con la horizontal, en este caso) y orientada al Norte con la ayuda de una brújula (Figura 10) para poder introducir las coordenadas relativas de sus puntos (respecto al origen del sistema) dentro de un plano horizontal ( $z = \text{cte.}$ ).

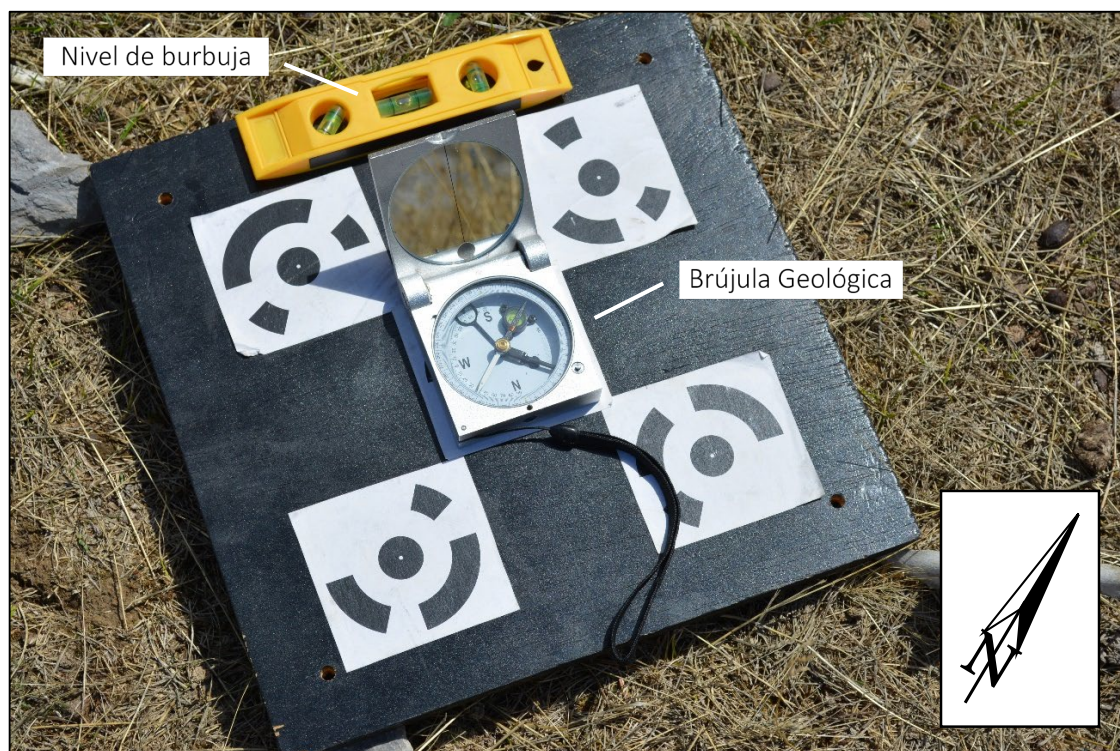


Figura 10. *Plantilla de Orientación Portátil 2.0.*

La Figura 10 muestra una imagen de campo donde se puede observar la “*Plantilla de Orientación Portátil*” empleada en este estudio. Esta nueva versión 2.0 de la Plantilla original está construida sobre una base de madera rígida, con unas dimensiones aproximadas de 200 mm de largo x 200 mm de ancho, a la que se le ha añadido un nivel de burbuja de 3 ejes para facilitar su nivelación. Asimismo, para facilitar su identificación, se han empleado las dianas codificadas proporcionadas por Agisoft Metashape para la ubicación de los 5 puntos de control incluidos en la Plantilla.

Por lo tanto, antes de iniciar la captura de imágenes en los túneles, se procedió a: (i) colocar, (ii) nivelar y (iii) orientar la Plantilla, situándola en la parte baja del frente (lo más centrada posible) para que pueda ser visible desde todos los ángulos, y asegurar, de este modo, que sus GCPs sean fácilmente reconocibles en el mayor número de fotografías (Figura 11).



Figura 11. Ubicación de la Plantilla en el frente de excavación del Túnel 1: a) Detalle; b) General.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

La incorporación de la Plantilla dentro de la escena ha resultado ser una solución rápida y sencilla a este problema. No obstante, este diseño solamente funciona cuando trabajamos con planos situados sobre superficies horizontales, eliminando la componente vertical de la ecuación. En este sentido, para realizar el escalado final del modelo 3D el programa solamente se apoyará en medidas relativas a 2 direcciones principales (las tomadas en el eje x: E-O y en el eje y: N-S).

Con el propósito de rellenar este vacío de información y ayudar al programa a medir correctamente la tercera dimensión, se utilizaron varios puntos de control adicionales (GCPs de validación) distribuidos a lo largo de la superficie de ambos frentes de excavación (6 en el Túnel 1 y 7 en el Túnel 2), de tal manera que las medidas entre estos GCPs puedan ser utilizadas como escalas de referencia vertical (Figura 12).

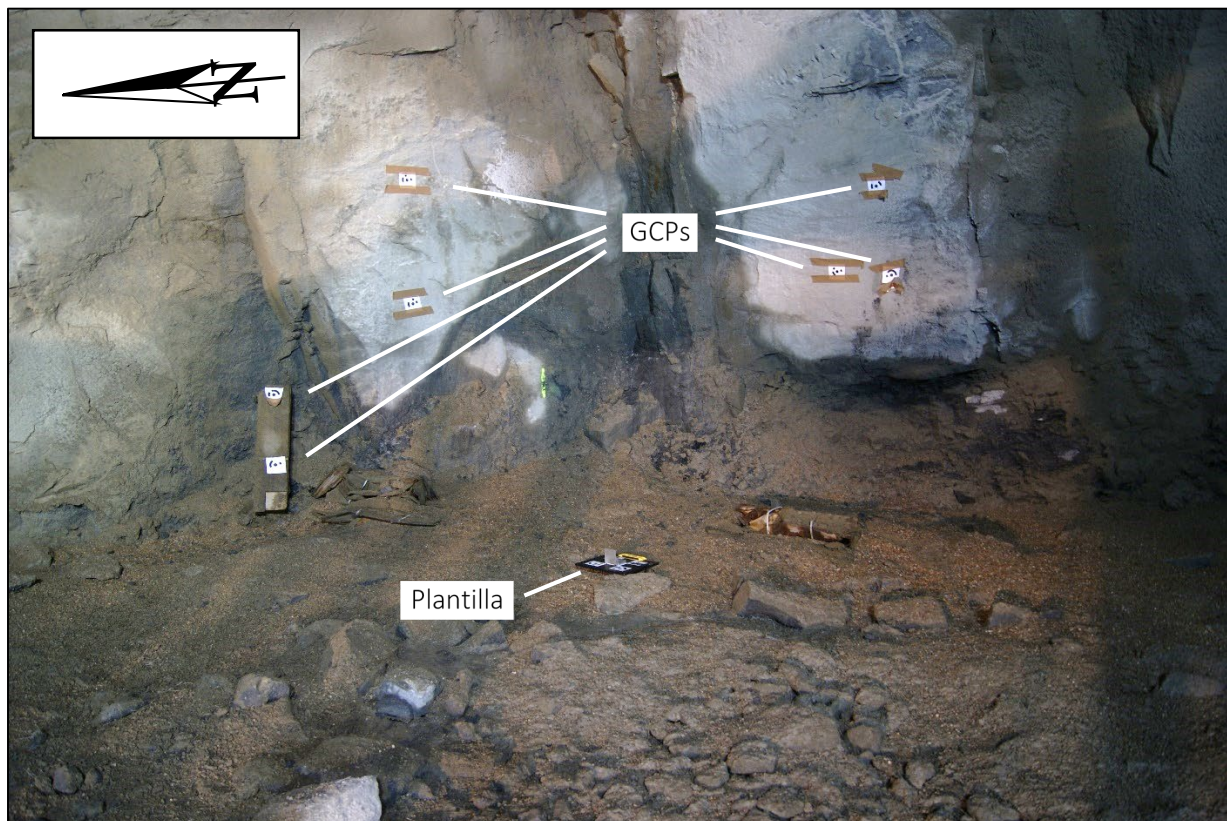


Figura 12. Distribución de los GCPs de validación (7) y ubicación de la Plantilla en el frente de excavación del Túnel 2.

A su vez, estos GCPs de validación servirán para analizar el verdadero potencial de la Plantilla como elemento principal de orientación/escalado; comparando las distancias reales entre dianas medidas “in situ” (con cinta métrica) con las mismas medidas efectuadas sobre los modelos 3D.

### 3.3.3. Adquisición de las imágenes

Para la generación de los modelos 3D de ambos túneles, se procedió a realizar un levantamiento fotogramétrico de amplio espectro; es decir, la adquisición de imágenes fue superior a la habitual, con el objetivo de obtener una base de datos lo suficientemente amplia, que será empleada posteriormente (ver Sección 3.4.3) para analizar la influencia del número de fotografías en la precisión de los resultados.

El equipo fotográfico empleado para obtener las imágenes fue una cámara digital réflex (modelo Sony  $\alpha$ 230) con una resolución de 10,2 MP (tamaño de imagen 3872 x 2592) en combinación con el objetivo Sony DT 18 – 55 mm f/3,5 – 5,6 SAM (distancia focal equivalente al formato de 35 mm: 27 – 82,5 mm) (ver Figura 13).



Figura 13. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Sony  $\alpha$ 230+18–55mm.

Además, en vista a las condiciones de iluminación presentes en ambos túneles (baja luminosidad) se decidió instalar el equipo fotográfico sobre un trípode semi-profesional (modelo YT-300 de Yashica) de altura regulable (máx. – mín.; 144 – 61 cm) y activar la cámara “a distancia” con la ayuda de un control remoto inalámbrico. De este modo, evitaremos disparar “mecánicamente” activando el pulsador con nuestra mano, eliminando la generación de cualquier tipo de vibración en el dispositivo durante la adquisición de las fotografías que introduzca “ruido” en las imágenes.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

De manera complementaria se añadió un soporte adicional al trípode –en forma de “L”– para poder instalar sobre el dispositivo una fuente de iluminación extra: una Antorcha LED recargable de luz continua (modelo YN-216 LEDs de Yongnuo) con una potencia máxima de 13 W, capaz de proporcionar un flujo luminoso de 2000 lúmenes y un ángulo de iluminación de 55° (Figura 14).



Figura 14. Configuración del equipo fotográfico empleado para la adquisición de las imágenes en los túneles: a) Detalle Antorcha LED; b) Cámara + Soporte + Antorcha + Trípode.

Notar que, a diferencia del *flash* fotográfico (puntual y momentáneo), la Antorcha LED nos proporciona una luz continua –brillante y uniforme– que nos ayuda a iluminar directamente donde apunta la cámara. De este modo, seremos capaces de corregir uno de los principales problemas asociados a la adquisición de imágenes en condiciones de baja luminosidad: la infra-exposición <sup>(1)</sup> de las fotografías. Además, el uso combinado de la Antorcha y el trípode semi-profesional nos ayudará a reducir al mínimo el tiempo de exposición al disparar ( $< 1/3''$ ); evitando la generación de “zonas de sombra” en las imágenes que puedan dar lugar a la formación de “zonas de oclusión” a la hora de generar los modelos 3D.

<sup>(1)</sup> La infra-exposición se genera cuando las barras de color del histograma tienden a concentrarse y desplazarse hacia la izquierda creando una “zona de sombra” y dejando una laguna de información en la zona de tonos blancos; con ello el rango dinámico disminuye y la foto pierde detalle.

Con el objetivo de adaptarse al contexto real de las obras subterráneas (y evaluar su influencia en los resultados), las condiciones de iluminación de ambos túneles fueron definidas por la presencia de equipos auxiliares habituales en este tipo de trabajos. En el Túnel 1, se emplearon tres focos portátiles de luz continua de 60 W situados a 4,5 m del frente, proporcionando una luminosidad aproximada (medida sobre la superficie de roca) de 90 – 120 LUX, sin incluir el efecto de la Antorcha LED (Figura 15).



Figura 15. Imagen de campo del Túnel 1: Condiciones iniciales de iluminación y posición de los focos.

En el Túnel 2 se aprovechó la iluminación dada por un jumbo de perforación situado en las proximidades del frente que acababa de ser utilizado para efectuar labores de barrenado (Figura 16).

En este caso, la luminosidad medida sobre la superficie de roca estaba en torno a 100 – 130 LUX (de nuevo, sin incluir el efecto de la Antorcha LED). Este valor es superior al del Túnel 1 y muestra cómo, a pesar de las condiciones habituales de trabajo en obras subterráneas, la escasa iluminación no resulta un problema para la utilización de cámaras fotográficas en este tipo de ambientes.

Este argumento suele ser utilizado habitualmente para desaconsejar el uso de las técnicas fotogramétricas en los túneles (dependientes de la luz) frente a la utilización de dispositivos láseres, como, por ejemplo, los sistemas LiDAR (independientes de las condiciones lumínicas).

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real



Figura 16. Imagen de campo del Túnel 2: Jumbo de perforación empleado para iluminar el frente.

El tiempo empleado en la preparación y toma de fotografías en cada uno de los túneles fue de 30', el mismo tiempo invertido en la campaña de campo con la brújula (ver Sección 3.3.4). Aunque estos tiempos pueden parecer muy elevados –teniendo en cuenta la disponibilidad de tiempo en un túnel– se optó por realizar una sobre-caracterización del frente para poder estudiar (una vez analizados los modelos 3D) las posibilidades de optimización del proceso. En comparación con la fotografía tradicional terrestre, la captura de imágenes en ambientes subterráneos poco iluminados exige una mayor dedicación y esmero en las labores previas al disparo, asegurando al máximo la estabilidad del sensor.

En este sentido e intentando ajustarse a los tiempos reales de obra, se optó por reducir el número final de posiciones de trabajo y compensarlo con un aumento en el número de fotografías. La idea es poder escanear el frente “foto a foto” desde cada ubicación, intentando mantener siempre un grado de superposición elevado (> 60 %) del mismo modo que si se buscara realizar una imagen panorámica (Figura 17). Por consiguiente, aunque la escena quede definida desde menos posiciones de cámara éstas contendrán más puntos en común.

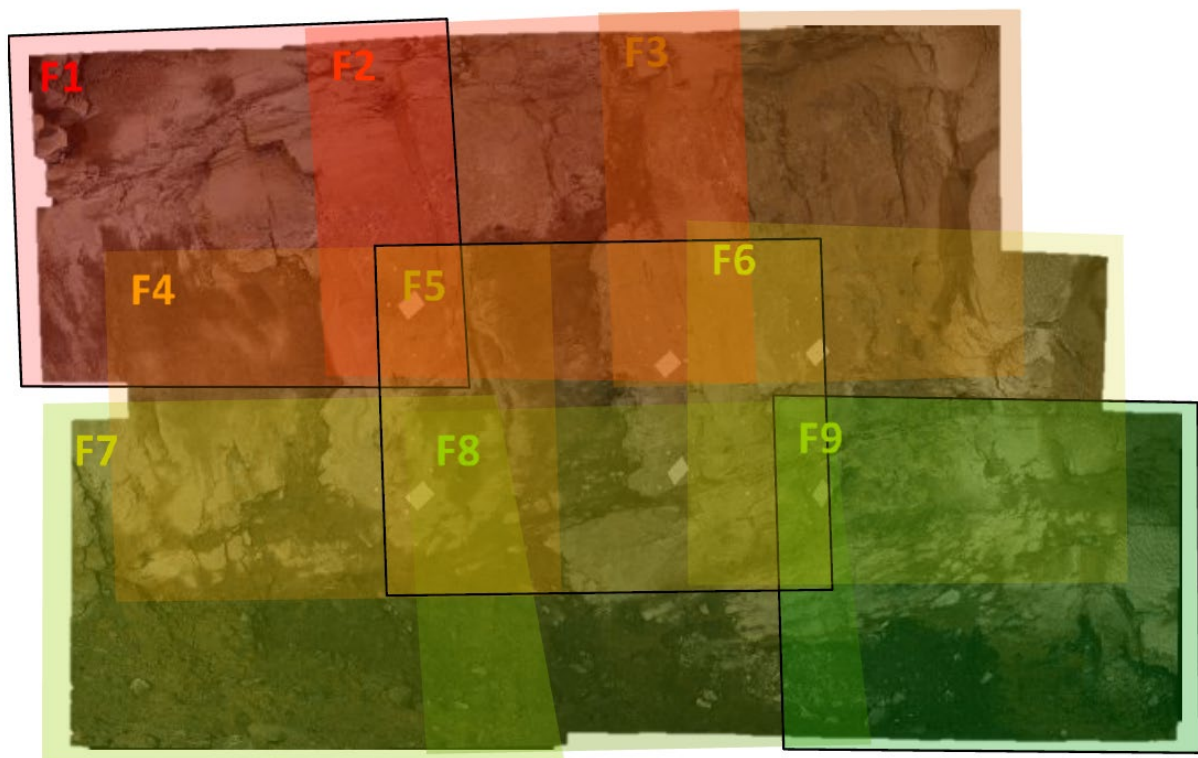


Figura 17. Imagen panorámica del frente de excavación del Túnel 2 donde es posible observar la secuencia de imágenes realizada desde cada posición “escaneando” el frente a partir de una serie encadenada de fotografías superpuestas (F1 – F9).

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Por otra parte, se decidió mantener los ajustes de la cámara siempre fijos: Modo manual (M), Enfoque automático (AF), Medición multisegmento, Apertura  $f/3,5 - 4,5$ , Velocidad de obturación  $1/4''$  y ISO 100; y trabajar con la misma distancia focal en ambos túneles: 18 mm (mín. distancia focal / máx. ángulo de visión). Estos parámetros han sido definidos antes de la toma de datos, buscando la configuración óptima del dispositivo en función de las condiciones lumínicas presentes en cada uno de los túneles. Con ello se reducen al mínimo las maniobras entre fotos (apuntar, estabilizar y disparar), ayudando a agilizar el proceso de toma de datos.

Por último, con la intención de evitar: (i) la aparición de cualquier tipo de “ruido digital” en las fotografías (como, por ejemplo, el “ruido de disparo” característico de ambientes con baja luminosidad) o (ii) la obtención de imágenes desenfocadas (ocasionadas por un posible movimiento accidental del sensor durante el momento “crítico” de apertura del obturador), se optó por la realización de imágenes dobles (disparando dos fotografías consecutivas, en lugar de solo una). De este modo se asegura, en la medida de nuestras posibilidades, la adquisición de imágenes de máxima calidad con el mayor grado de detalle posible (100 % nítidas y sin ruido); seleccionando entre cada par de imágenes, la mejor.

Finalmente, se efectuaron un total de 169 fotografías en el Túnel 1 ( $f/4,5$ ) desde 22 posiciones diferentes (Figura 18) y 206 fotografías en el Túnel 2 ( $f/3,5$ ) desde 18 posiciones diferentes (Figura 19); 37 imágenes más que en el Túnel 1 debido al aumento de sección (frente sección completa).

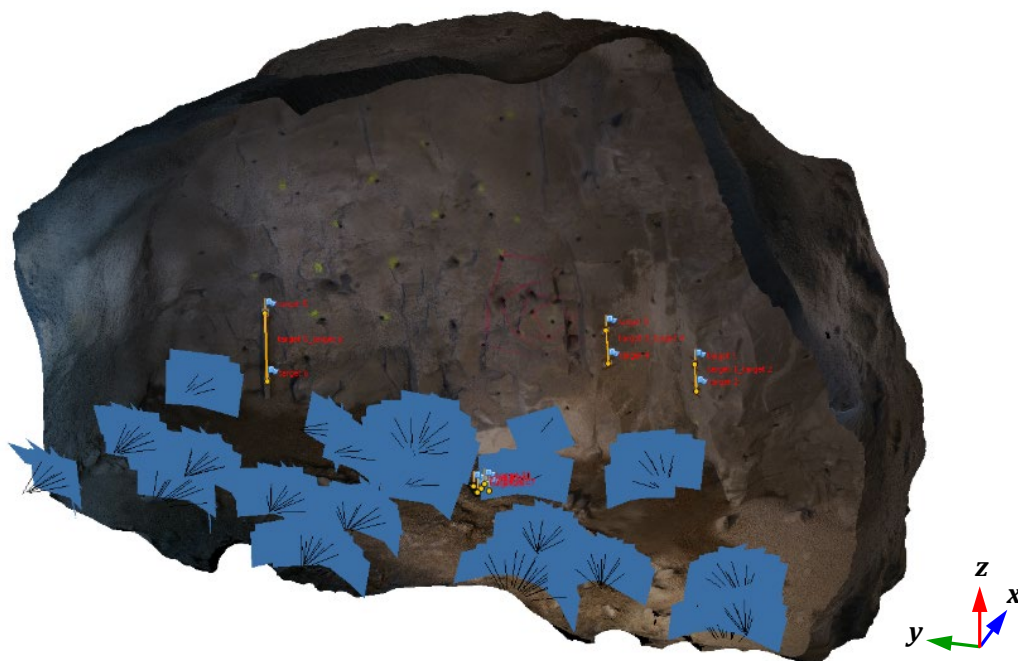


Figura 18. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías realizadas en Túnel 1.

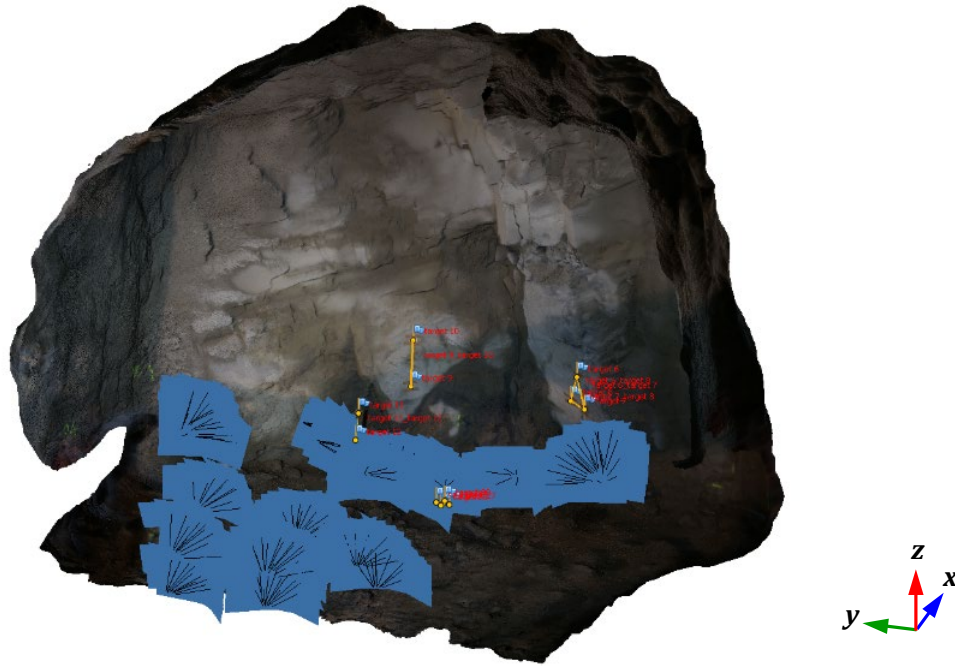


Figura 19. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías realizadas en el Túnel 2.

En contraste con el Túnel 1, la presencia de un jumbo de perforación en el Túnel 2 limitó en gran medida la movilidad del equipo fotográfico; imposibilitando el acceso a los hastiales, por lo que la toma de imágenes se tuvo que restringir al sector central (Figura 20b). En la zona frontal, más despejada, fue posible repetir el procedimiento del Túnel 1 (Figura 20a). Sin embargo, en la zona trasera, la presencia del jumbo hizo imposible realizar un barrido longitudinal del frente, obligando a reducir el número final de posiciones de cámara, intentando cubrir la totalidad del frente desde una zona menos extensa.

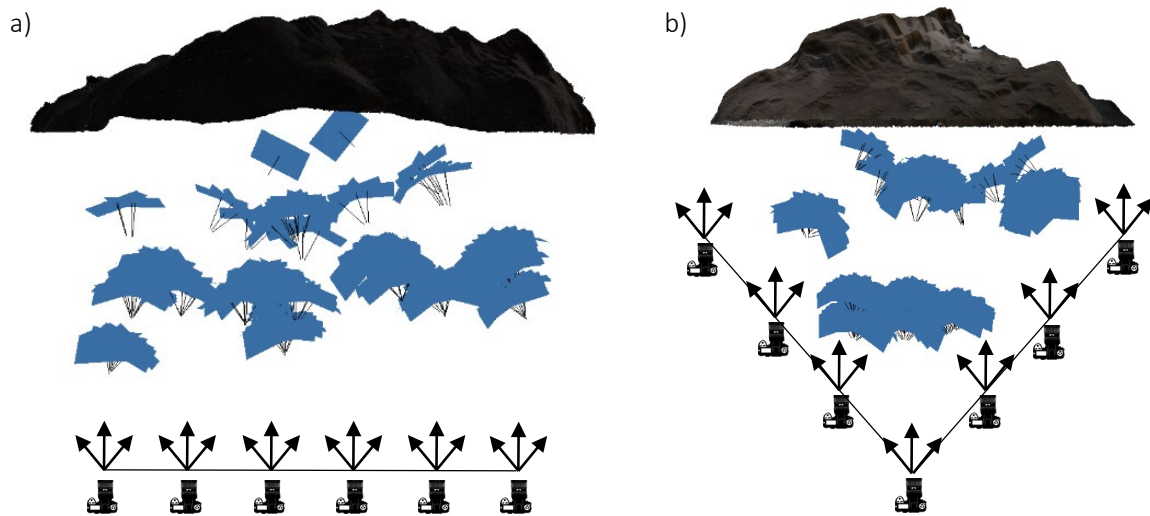


Figura 20. Trayectorias de desplazamiento de cámara: a) Túnel 1; b) Túnel 2.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

### 3.3.4. Caracterización manual de las familias

Una vez finalizada la campaña fotogramétrica se procedió a la realización una caracterización manual de las familias de discontinuidades presentes en el frente de excavación de ambos túneles (Figura 21), con el fin de disponer de la información necesaria para comparar los resultados obtenidos con la metodología SfM y poder cuantificar de este modo las diferencias angulares (o desviaciones) entre ambas medidas. Estas variaciones estarán directamente asociadas a la utilización de la fotogrametría digital SfM en combinación con el programa DSE como herramienta de análisis geométrico remoto. Por lo tanto, su análisis y estudio nos permitirá conocer a fondo el rendimiento real de esta técnica en obra, comparándola con los ya tradicionales métodos manuales.



Figura 21. Caracterización manual de las familias de discontinuidades en el Túnel 2.

La campaña de campo para la toma de datos con brújula presentó dos dificultades iniciales asociadas a la zona de trabajo de ambos túneles: Por un lado, (i) la presencia de hormigón proyectado sobre el propio frente ocultaba parcialmente los planos de discontinuidad dificultando su identificación, y, por otro lado, (ii) debido a nuestra propia limitación (humana) solamente fue posible realizar medidas por debajo de los 2 m de altura; esto nos obligó a realizar una medición “selectiva” de los planos de discontinuidad, renunciando a analizar todas las superficies presentes en ambos túneles.

Para ello, en primer lugar, se identificó visualmente el número de familias principales presentes en los dos frentes (dos verticales conjugadas y una sub-horizontal), para, a continuación, efectuar la toma de datos directamente sobre estos planos, sin analizar la totalidad del macizo. (Notar que, el objetivo principal del trabajo no es realizar una caracterización completa del mismo, sino comparar las medidas manuales con las obtenidas con DSE, por lo tanto, se renunció a la representatividad de los datos en pos de obtener unos valores “a priori” más precisos.)

La identificación manual de las familias principales se llevó a cabo mediante el uso de una brújula geológica tipo Freiburger y se tomaron un total de 52 medidas (19 en el Túnel 1 y 33 en el Túnel 2).

El tiempo total empleado para la adquisición de estos datos fue de 30' por túnel. Aunque este valor pueda parecer muy elevado (en comparación con el número de medidas realizadas) se priorizó la calidad de los resultados; efectuando una medición “selectiva” mucho más lenta que la tradicional. La Figura 22 muestra la proyección estereográfica de los polos de las discontinuidades medidas con brújula en ambos túneles, junto a las direcciones de buzamiento y buzamiento (DD/D) de los 3 planos principales identificados con la ayuda del software DIPS (Rocscience, 2017).

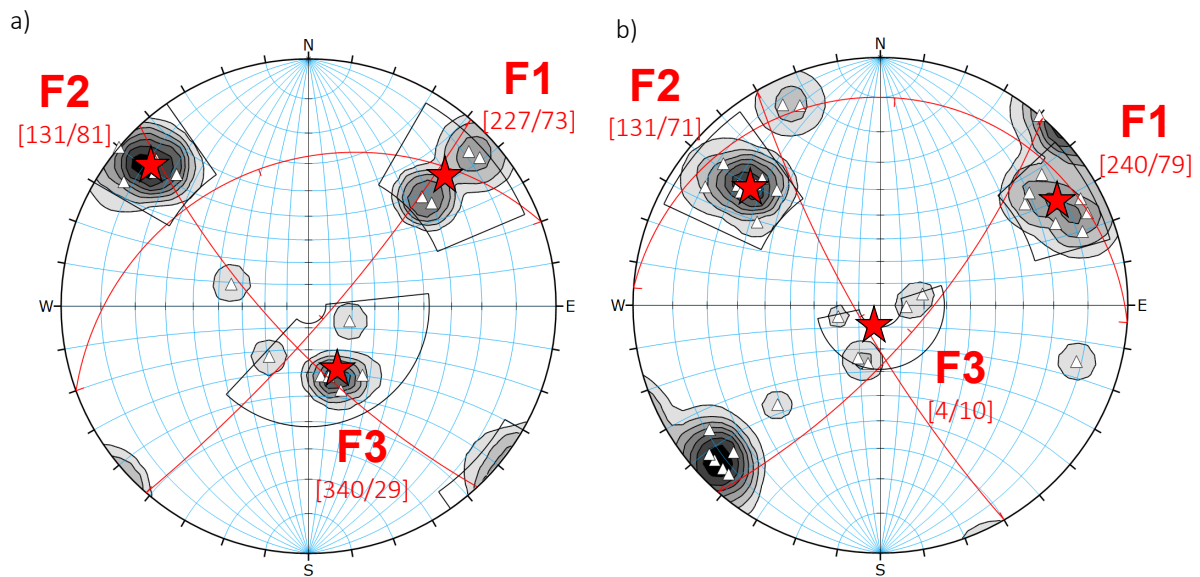


Figura 22. Proyección estereográfica polar de las orientaciones de los planos de discontinuidad medidos en campo (símbolos  $\Delta$ ): a) Túnel 1; b) Túnel 2. Los valores de las familias principales (F1, F2 y F3) se muestran entre corchetes (en rojo) y los contornos (en color gris) representan las concentraciones de los polos calculadas a partir del método de distribución Fisher.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Finalmente se identificaron 3 familias principales en ambos túneles. Las dos primeras (F1 y F2) son sub-verticales ( $D \approx 70 - 80^\circ$ ) y presentan orientaciones conjugadas ( $\Delta DD = 97^\circ$ ): La familia F1 muestra una dirección de buzamiento aproximada de  $234^\circ$  (SO) y la familia F2 una dirección de buzamiento de  $131^\circ$  (SE). Estas dos familias de discontinuidad afloran con claridad en ambos frentes, siendo cortadas a  $45^\circ$  por el propio trazado del túnel: N – S (dirección de avance de los túneles en el momento de la toma de datos O – E).

La familia F3 presenta un buzamiento sub-horizontal ( $D \approx 15 - 30^\circ$ ) y una dirección de buzamiento mucho más variable de aproximadamente  $340^\circ$  (NNO) en el Túnel 1 y  $4^\circ$  (NNE) en el Túnel 2. Estos factores, combinados con la propia orientación del frente de avance E – O, convierte la zona donde aflora esta familia F3, en la superficie perfecta para la acumulación de hormigón proyectado, especialmente en las partes más bajas del frente. Esta situación ha dificultado en gran medida su propio cálculo, restringiendo su análisis a su cara adversa (muro), que solamente aflora con claridad en la zona superior del frente, inaccesible para las medidas manuales. Sin embargo, aunque este incidente pueda parecer “a simple vista” un problema, constituye una gran oportunidad para poner a prueba las ventajas que ofrecen los métodos remotos para el análisis de zonas elevadas “inaccesibles” por métodos tradicionales.

Por último, cabe destacar que en el caso particular del Túnel 2 (Figura 22b) se observó que la familia F1 parece desdoblarse a su vez en dos subfamilias opuestas: F1A y F1B; con diferentes valores de dirección de buzamiento ( $DD \pm 195^\circ$ ) y buzamiento (F1A =  $79^\circ$ ; F1B =  $84^\circ$ ). No obstante, puede tratarse sólo de un problema intrínseco de los planos sub-verticales, donde pequeñas variaciones en la inclinación de los planos pueden dar medidas con  $DD \pm 180^\circ$  de diferencia (p.ej. un plano vertical con un buzamiento de  $90^\circ$  y dirección norte se puede denotar como 0/90 o 180/90 indistintamente). Esta hipótesis queda reforzada por la ausencia de dicha duplicidad en el Túnel 1, donde la familia F1 (con un buzamiento de  $73^\circ$ ) sólo se manifiesta como una única agrupación de valores con una dirección de buzamiento próxima a los  $227^\circ$ .

Por lo tanto, se definieron únicamente 3 familias de juntas (dos sub-verticales y una sub-horizontal) con presencia en ambos túneles: F1, F2 y F3.

### 3.3.5. Generación de los modelos 3D

Para la construcción de los modelos 3D de los túneles, se generó una nube de puntos de alta densidad empleando las fotografías digitales efectuadas en cada uno de los frentes de excavación (Túnel 1 y Túnel 2). Esta tarea se realizó utilizando la versión profesional del software Agisoft Metashape. (Notar que, la versión estándar del programa no permite trabajar con puntos de control (GCPs), necesarios para orientar y escalar correctamente los modelos). Se generaron dos modelos 3D (uno para cada túnel) utilizando todas las fotografías disponibles (169 para Túnel 1 y 206 para Túnel 2).

Para ello, el primer paso (i) es generar una nube de puntos dispersa (DPC) donde el programa alinea y orienta las imágenes a partir de la identificación de puntos en común en las fotografías. En este paso, Agisoft Metashape permite al usuario seleccionar diferentes "niveles de computación" (mínima, baja, media, alta y máxima) que influyen en la precisión y calidad de los resultados. En este trabajo, se ha seleccionado una calidad de procesamiento media, de este modo, seremos capaces de reducir significativamente el tiempo de procesado, manteniendo una precisión aceptable. (Notar que, al trabajar con un número de imágenes tan elevado  $> 150$ , la selección de un nivel de procesado u otro influye en gran medida en los tiempos de procesado del siguiente paso (HDPC), por lo tanto, es necesario ajustar esta calidad para no penalizar –obteniendo información redundante– la siguiente etapa del proceso.) La Tabla 1 muestra los tiempos de cálculo requeridos para la generación de las nubes iniciales (DPC) en ambos túneles. Sin embargo, estas nubes dispersas, no poseen aún la calidad, densidad y precisión necesarias para la extracción de planos de discontinuidad empleando el software DSE. Por lo tanto, es necesario realizar un segundo paso (ii) para poder generar una nueva nube de puntos de alta densidad (HDPC), similar a la proporcionada por los dispositivos LiDAR, usando técnicas MVS. Este es el paso más costoso desde el punto de vista computacional, tomando alrededor del 95 % del tiempo de procesamiento total (ver Tabla 1). Al igual que con las nubes de puntos dispersas, las nubes de puntos de alta densidad también se generaron empleado un nivel medio de calidad de procesamiento. (Todos los cálculos se realizaron utilizando un solo núcleo de una computadora Intel Core i7 – 6700 (procesador de 3,4 GHz y 16 GB de RAM) ejecutando el sistema operativo Windows.)

Tabla 1. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en los túneles.

Modelo	DPC		HDPC	
	Precisión	Tiempo	Precisión	Tiempo
Túnel 1	Media	1 h 1 min	Media	20 h 46 min
Túnel 2	Media	1h 17 min	Media	23 h 45 min

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Una vez generadas las nubes de alta densidad (HDPC) de ambos túneles, estas fueron orientadas y escaladas a partir de las coordenadas relativas de los 5 puntos de control (GCPs) incluidos en la Plantilla de Orientación Portátil 2.0 situada en ambos frentes. A continuación, se muestran los errores medios (x, y, z) de dichas coordenadas: es decir, las diferencias entre sus coordenadas reales (conocidas) y las proporcionadas por Agisoft Metashape al orientar los modelos 3D (Tabla 2).

Tabla 2. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 5 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en los túneles.

Coordenada	Túnel 1	Túnel 2
X	0,333	4,043
Y	0,389	1,884
Z	0,062	2,142

Por último, para poder evaluar mejor la calidad de los modelos 3D generados (y analizar su precisión en su componente vertical), se compararon las distancias entre los diferentes “GCPs de validación” instalados en ambos frentes (medidas con cinta métrica “in situ”) y las distancias correspondientes estimadas directamente a través de los modelos 3D escalados. La Tabla 3 resume los errores que se calcularon en base a dicho análisis. En ella, es posible observar que los errores de medida en el Túnel 2 son ligeramente superiores a los del Túnel 1. Este hecho podría deberse a que el modelo 3D del Túnel 2 se construyó usando una gran cantidad de imágenes (206), aumentando la probabilidad de introducir ruido e incertidumbre adicional al modelo (ver Sección 3.4.3 para más información).

Tabla 3. Errores de distancia de las escalas de referencia verticales formadas por los GCPs de validación: (Real) medida con cinta métrica “in situ”; (Estimada) medida en el Modelo 3D.

Modelo	Escala de referencia	Distancia		
		Real [mm]	Estimada [mm]	Error [mm]
Túnel 1	target 1_target 2	367	367,2	0,2
	target 3_target 4	443	442,7	0,3
	target 5_target 6	942	942,1	0,1
Túnel 2	target 1_target 2	441	451,0	10,0
	target 3_target 4	755	776,0	21,0
	target 5_target 6	547	561,1	14,1
	target 5_target 7	598	611,7	13,7
	target 6_target 7	350	359,1	9,1

### 3.3.6. Edición de los modelos 3D para su uso en DSE

El análisis para la determinación de los planos de discontinuidad presentes en ambos túneles (y su agrupación en familias) se ha realizado a partir de la utilización del software de código abierto DSE (Discontinuity Set Extractor). Este programa (Riquelme et al. 2014) aplica una nueva metodología que permite la identificación semi-automática de los puntos de una nube (no organizada) que están dispuestos “en planos” dentro de un espacio tridimensional. Para ello, el programa aplicada los siguientes pasos:

1. Para cada punto de la nube de puntos 3D, se selecciona un subconjunto de puntos vecinos y se realiza una prueba de coplanaridad basada en un análisis de componentes principales (PCA) para verificar si existe un área plana alrededor del punto (o no). Si existe, el plano de mejor ajuste se obtiene utilizando el tercer vector propio del análisis de PCA.
2. Los planos de mejor ajuste obtenidos en el paso anterior se representan en una proyección estereográfica, de modo que se obtiene una nube correspondiente a sus polos. A continuación, se estima una función de densidad de probabilidad (PDF) de la nube de polos utilizando métodos no paramétricos basados en la estimación de la densidad del núcleo. Esta PDF de las orientaciones de los polos puede emplearse para identificar los conjuntos principales de discontinuidad y sus orientaciones representativas, utilizando dos condiciones: (i) un valor mínimo del ángulo agudo formado por dos polos representativos, y (ii) un número máximo de familias de discontinuidad (Notar que, de manera alternativa, también podrían emplearse otros algoritmos para la agrupación de estos conjuntos de discontinuidad, véase, por ejemplo, Jiménez-Rodríguez y Sitar, 2006b).
3. Luego, cada uno de los polos de la nube inicial es (i) asignado a una de las familias identificadas en el paso 2, o (ii) se elimina, si el polo no pertenece a un conjunto de discontinuidad. Para ello, cada polo se asigna a la familia cuyo polo representativo forma el ángulo agudo mínimo con dicho polo, siempre que este sea menor que un valor preestablecido (si no, se elimina).

En este sentido, para facilitar la labor al programa a la hora de identificar correctamente las familias principales presentes en ambos frentes, y evitar la introducción de información “errática” dentro del análisis, se ha decidido proceder a la edición previa de las nubes de puntos de alta densidad (HDPC) generadas en el paso anterior.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Para ello, las nubes de puntos pueden ser editadas, clasificadas y exportadas antes de ser analizadas en DSE. No obstante, se observó que trabajar con los modelos 3D completos podía ser contraproducente, ya que el hormigón proyectado empleado para soportar los túneles ocultaba parcialmente los planos de discontinuidad presentes en ambos frentes y sus intersecciones. Por lo tanto, para evitar estas dificultades, las nubes de puntos de alta densidad fueron modificadas manualmente (dentro del propio programa Agisoft Metashape) eliminando las áreas con mayor acumulación de hormigón proyectado (concentrado, principalmente, en el perímetro de los frentes); conservando únicamente aquellas zonas donde el macizo rocoso se mostraba “limpio” sin presencia de gunita (zona central de los frentes). De esta forma, se generaron 2 nuevas HDPC denominadas “Regiones de interés” (ROIs) de los modelo 3D generados (Figura 23).

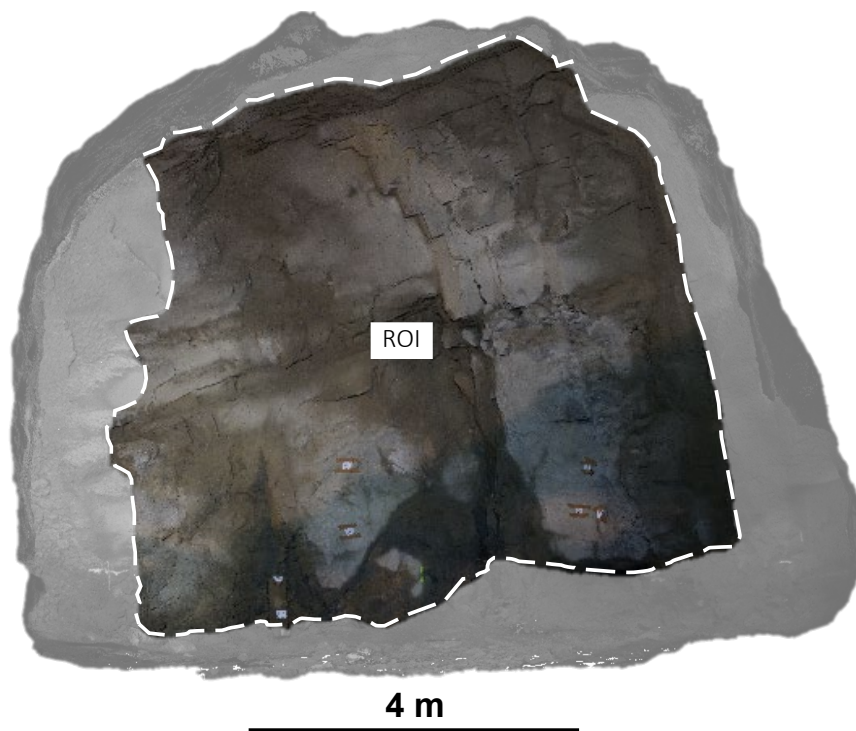


Figura 23. Región de Interés (ROI) del Túnel 2.

La Tabla 4 muestra, para cada túnel, el área de las superficies de las nubes de puntos de alta densidad que constituyen las ROIs, comparándolas con las áreas de los frentes y las áreas totales de los modelos 3D completos. Este proceso de reducción, que tiene como principal objetivo considerar solo las regiones del frente donde se observa el macizo rocoso “inalterado”, tiene dos ventajas principales: (i) contribuye a minimizar la incertidumbre de los resultados, y (ii) ayuda a reducir en gran medida el tamaño de las nubes, reduciendo así su costo computacional y los tiempos de procesamiento necesarios para extraer las discontinuidades con DSE.

Tabla 4. Superficie de las Regiones de Interés (ROIs) analizadas en DSE y comparación respecto a las superficies de los frentes y los Modelos 3D completos.

Modelo	Superficie		
	ROI [m <sup>2</sup> ]	Frente [m <sup>2</sup> ]	Modelo 3D [m <sup>2</sup> ]
Túnel 1	33,9	63,9	137,8
Túnel 2	53,3	96,3	191,5

Además, según lo indicado al principio de esta sección, el proceso seguido por el software DSE a la hora de identificar (o “extraer”) los conjuntos principales de discontinuidad, se basa en el análisis de la función de densidad de probabilidad (PDF) de las orientaciones de todos los polos que superan con éxito la prueba de coplanaridad. Este proceso nos ayuda a determinar las familias principales presentes en las nubes de puntos y sus orientaciones representativas. Por lo tanto, la distribución de la densidad de puntos en los modelos (puntos/cm<sup>2</sup>) juega un papel “crucial” a la hora de aplicar esta función y determinar el número (y la orientación) de las familias principales presentes en los frentes analizados.

Este tipo de sesgo plantea un desafío al algoritmo de DSE, ya que las familias de discontinuidades que son más paralelas a la visual tienden a estar poco representadas en la gráfica de densidad polar, por lo tanto, son más difíciles de identificar; condicionando los resultados en función de las posiciones de cámara empleadas para la generación de los modelos 3D.

Una solución a este problema, que ya ha sido aplicada para taludes superficiales (Riquelme 2015), es establecer una distancia mínima entre los puntos de la nube con la ayuda de un filtrado automático (sub-muestreo) aplicado a las Regiones de Interés generadas. De este modo, todas las superficies de discontinuidad presentes en los macizos tendrán la misma densidad, y las diferencias de intensidad mostradas en las gráficas de densidad polar solamente corresponderán a la mayor (o menor) presencia de estas superficies en los modelos.

Por esta razón, hemos decidido limitar a 1 cm la distancia mínima entre los puntos de las nubes de puntos de alta densidad (ROIs) generadas en ambos túneles (Figura 24). Este sub-muestreo se realizó con la ayuda del programa CloudCompare (Girardeau-Montaut 2016) un software de código abierto que permite (de manera muy sencilla) visualizar, editar y procesar nubes de puntos de alta densidad dentro de un entorno tridimensional de fácil manejo. (Notar que, al igual que en el paso anterior (recorte y selección de las ROIs) este sub-muestreo contribuye, de nuevo, a disminuir drásticamente el tamaño de las nubes de puntos; facilitando almacenamiento, transporte y posterior procesado en DSE.)

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

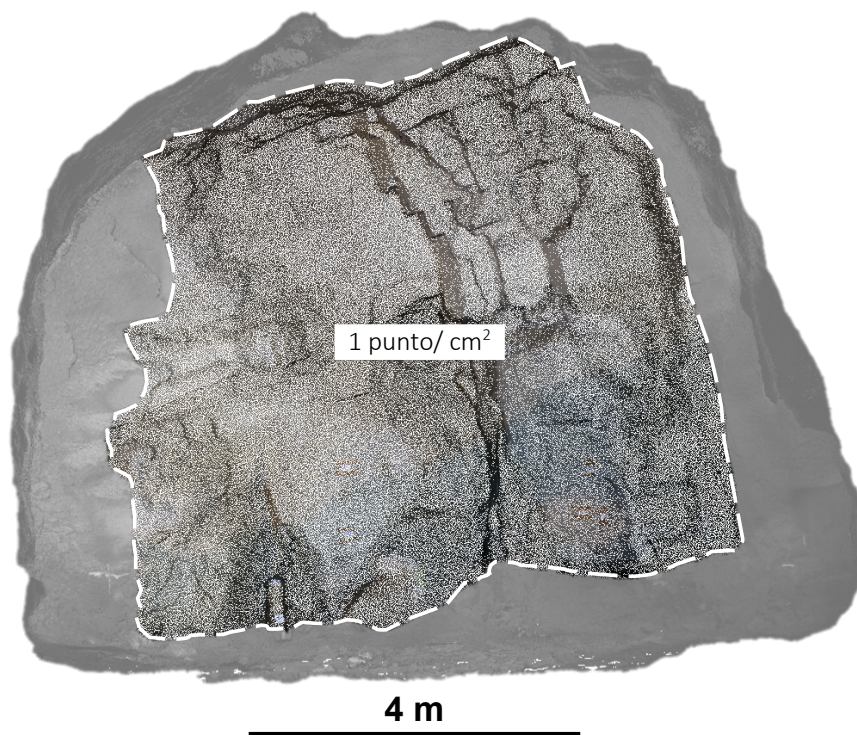


Figura 24. Región de Interés (ROI) del Túnel 2 después de aplicar el sub-muestreo.

### 3.4. Resultados y discusión

#### 3.4.1. Resultados del Túnel 1

La Figura 25 y la Tabla 5 muestran los resultados de los análisis realizados con DSE para la identificación de las familias de discontinuidad presentes en el Túnel 1. En particular, la Figura 25 muestra el diagrama de densidad de polos en proyección estereográfica (hemisferio inferior, igual ángulo) de las familias de discontinuidades "extraídas" con DSE empleando los planos identificados dentro de la nube de puntos de alta densidad de la región de interés (ROI); construida a partir del modelo 3D generado y recortado en Agisoft Metashape usando las 169 fotografías tomadas en el frente del túnel, filtrado posteriormente con la ayuda de CloudCompare (1 punto/cm<sup>2</sup>). La Tabla 5 resume los valores representativos de las orientaciones (en Dip Direction/Dip y Trend/Plunge) para cada familia de discontinuidad.

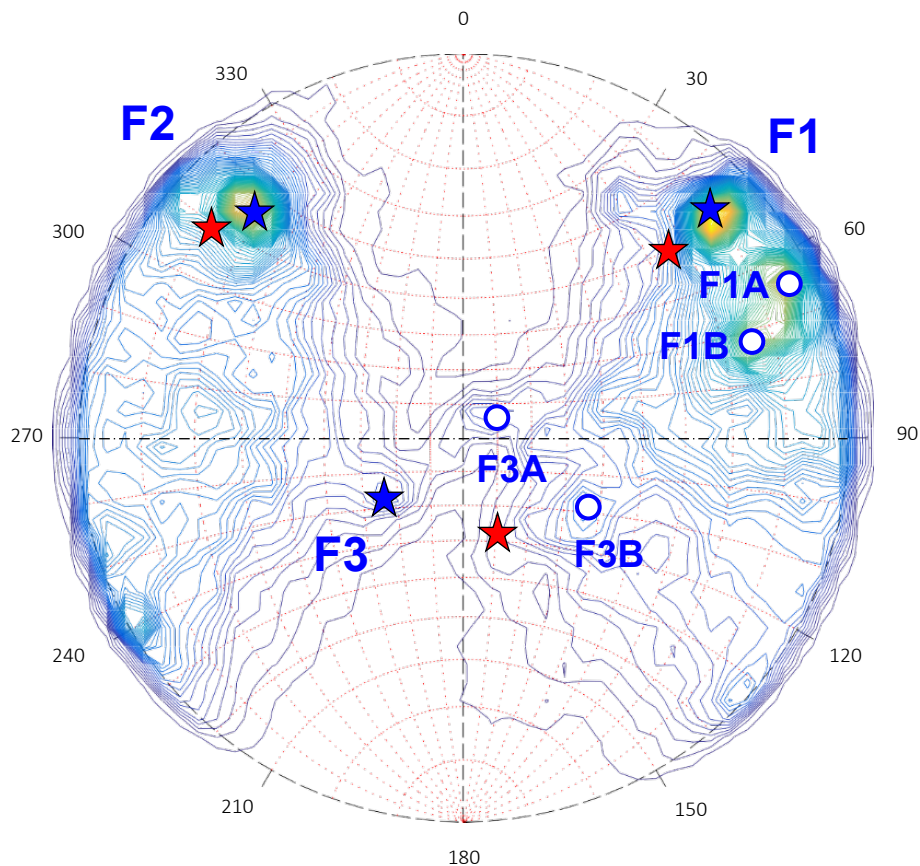


Figura 25. Diagrama de densidad de polos (vectores normales) en proyección estereográfica y polos principales identificados: F1 (227/82), F2 (137/78) y F3 (52/30) de entre todos los planos de discontinuidad presentes en el Túnel 1 (estrellas azules) calculados con DSE. También se proporcionan los resultados obtenidos mediante la caracterización manual con brújula (estrellas rojas), así como los posibles planos secundarios: F1A (244/85), F1B (251/76), F3A (226/11) y F3B (298/39).

Tabla 5. Orientaciones representativas proporcionadas por DSE a partir del análisis de la Región de Interés (ROI) del Túnel 1.

Familias de discontinuidad	Plano		Normal			% Sobre el total de puntos
	Dip [°]	Direction	Dip [°]	Trend [°]	$\alpha$ Plunge [°]	
F1 (principal)	227		82	47	8	8,46
F1A	244		85	64	5	10,39
F1B	251		76	71	14	10,02
F2 (principal)	137		78	317	12	11,14
F3(principal)	52		30	232	60	0,99
F3A	226		11	46	79	0,67
F3B	298		39	118	51	1,83

Al observar los resultados mostrados en la Figura 25 y la Tabla 5, identificamos un total de 7 conjuntos de discontinuidades: F1, F1A, F1B, F2, F3, F3A y F3B, sin embargo, las familias F1A, F1B, F3A y F3B no representan (como se demostrará más adelante) familias de discontinuidades reales, ya que corresponde a planos “artificiales” generados por la acumulación de hormigón proyectado en el frente de excavación del Túnel 1.

La Tabla 6 muestra las diferencias entre las orientaciones de las familias de discontinuidad principales (F1, F2 y F3) "extraídas" con DSE de la nube de puntos de alta densidad de la ROI de Túnel 1 y las orientaciones representativas de las familias de discontinuidad analizadas con DIPS empleando las medidas manuales efectuadas con brújula. Las diferencias angulares entre las orientaciones de los planos (DIPS – DSE) se ha calculado usando el ángulo agudo formado por sus vectores unitarios (Jiménez-Rodríguez y Sitar, 2006b).

Tabla 6. Diferencias de orientación entre las familias principales identificadas por DIPS (a partir de las medidas manuales efectuadas con brújula) y las orientaciones representativas (principales) proporcionadas por DSE en la Región de Interés (ROI) del Túnel 1.

Familias de discontinuidad	DIPS		DSE			Diferencia $\delta$ [°]
	Dip [°]	Direction	Dip [°]	Dip [°]	Direction	
F1	227		73	227	82	9
F2	131		81	137	78	9
F3	340		29	52	30	34

Los resultados proporcionados por ambos métodos son muy similares: a partir del modelo 3D, DSE identifica tres familias de discontinuidad principales (F1, F2 y F3) que son prácticamente iguales a las identificadas con DIPS. En concreto, DSE identifica dos familias sub-verticales conjugadas entre sí (F1 y F2, con  $\Delta DD = 90^\circ$ ) cuyas orientaciones aparecen claramente agrupadas dentro del diagrama de densidad polar, facilitando su identificación (Figura 25). Estas orientaciones (Dip Direction/Dip) son muy similares a las de las familias principales identificadas a partir de métodos manuales, con diferencias máximas entre sus vectores unitarios de solamente  $9^\circ$ , un valor que está dentro del rango de error asociado a las mediciones tradicionales efectuadas con brújula.

Notar que, por ejemplo, Windsor y Robertson (1994) estimaron errores asociados a las medidas realizadas con brújula de alrededor de  $5^\circ$  para el valor del buzamiento y de unos  $10^\circ$  para el valor de la dirección de buzamiento. Este rango de error podría ser aún mayor para los planos sub-horizontales; Robertson (1970) informa de errores de  $\pm 20^\circ$  en los valores de la dirección de buzamiento cuando el ángulo de buzamiento del plano está por debajo de  $10^\circ$ . Al transferir estas variaciones a nuestra escala de trabajo (es decir, considerando las diferencias entre los ángulos agudos formados por los vectores normales de los planos principales), se traducen a errores que varían entre  $6^\circ$  y  $11^\circ$ , en función del ángulo de buzamiento que presente la discontinuidad. Asimismo, si tenemos en cuenta los resultados proporcionados por Drews et al. (2018) al comparar las orientaciones proporcionadas por planos individuales obtenidos con brújula frente a los valores calculados a partir de un algoritmo automático de detección de planos 3D obtenidos a partir de láser escáner, las diferencias angulares medias entre ambos métodos fueron de  $5^\circ$  (con diferencias máximas de  $13^\circ$ ); similares a las obtenidas aplicando nuestra metodología.

Por otro lado, al observar los resultados proporcionados por DSE para la familia de discontinuidad sub-horizontal (F3), el diagrama de densidad polar nos muestra tres máximos de concentración (F3, F3A y F3B) localizados alrededor de la discontinuidad principal F3 identificada con DIPS a partir de métodos manuales (ver estrella roja en la Figura 25). No obstante, una vez descartadas las familias F3A y F3B (debido a la acumulación de hormigón proyectado, como se demostrará a continuación) las diferencias angulares entre ambos métodos (DIPS – DSE) para esta familia F3 aumentan hasta los  $34^\circ$  (ver Tabla 6). No obstante, este incremento en el ángulo de error es debido (al menos parcialmente) al reto que supone analizar en DSE nubes de puntos donde “afloran” discontinuidades dispuestas en planos paralelos a la visual (Riquelme 2015); así como a las propias dificultades asociadas a la obtención de medidas manuales en planos horizontales (Terzaghi 1965) y la gran acumulación de gunita en los planos sub-horizontales formados por la familia F3, lo cual dificulta en gran medida su correcta medición.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Sin embargo, una de las principales ventajas que nos proporciona la metodología SfM presentada en este capítulo (frente los métodos manuales) es la posibilidad de utilizar herramientas externas de modelado 3D que nos permiten realizar una visualización (tridimensional) conjunta de los resultados proporcionados por DSE en combinación con los modelos 3D originales; superponiendo los planos asociados a cada discontinuidad con las nubes de puntos de alta densidad generadas en Agisoft Metashape. Los resultados de este análisis, realizado en el software CloudCompare, se muestran en la Figura 26, donde es posible observar que las familias F1 y F2 afloran con claridad en el frente del Túnel 1 (en un alto porcentaje); mientras que la familia sub-horizontal F3 aparece representada con menor frecuencia (aflorando principalmente en las zonas altas del frente).

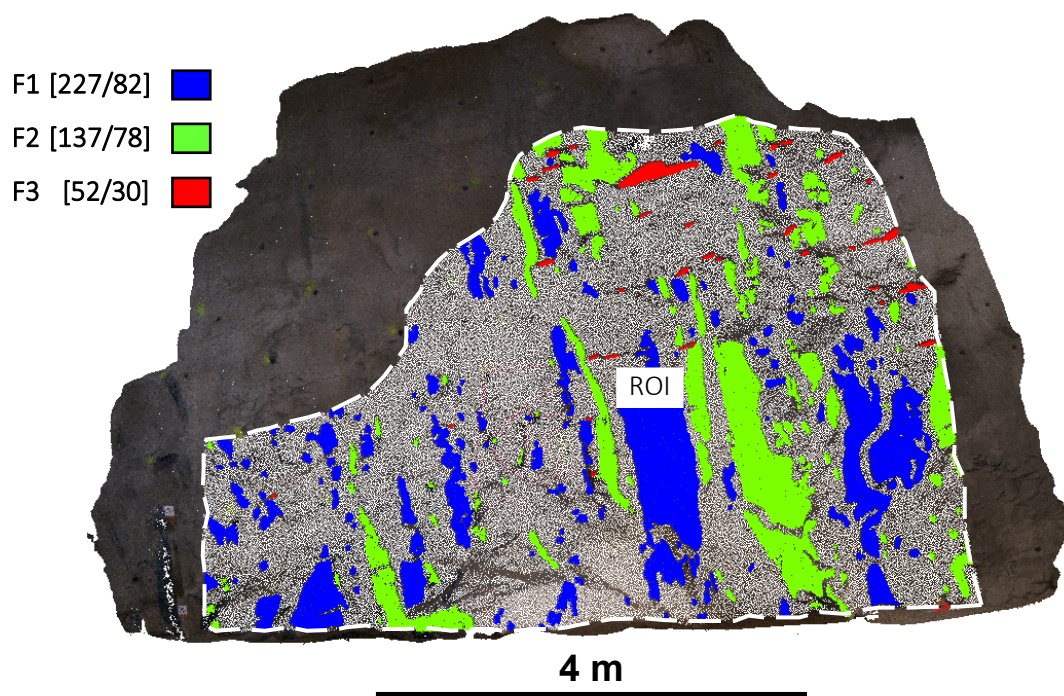


Figura 26. Distribución espacial de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2 y F3) identificadas por DSE en el Túnel 1, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.

Del mismo modo, gracias a esta herramienta, es posible proyectar (de manera aislada) las tres agrupaciones principales en las que se divide la familia sub-horizontal F3: F3 (52/30), F3A (226/11) y F3B (298/39), y poder determinar “visualmente” si los planos secundarios (F3A y F3B) corresponden finalmente a superficies de discontinuidad reales o, por el contrario, corresponden a zonas de meteorización y acumulación de hormigón proyectado con relevancia estadística. Estos resultados se muestran en la Figura 27 superponiendo (de nuevo) los resultados de DSE sobre los modelos originales.

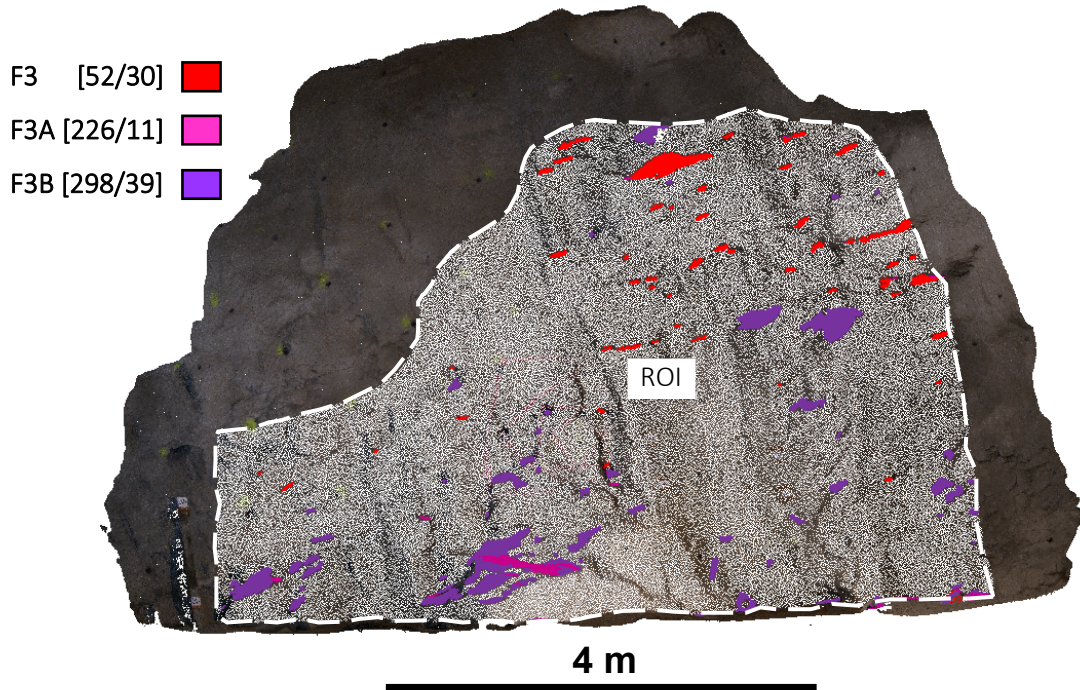


Figura 27. Distribución espacial de los planos de discontinuidad sub-horizontales (F3, F3A y F3B) identificados por DSE en el Túnel 1, proyectados sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.

Al observar los resultados mostrados en la Figura 27, es posible determinar el verdadero origen de estas discontinuidades secundarias: El plano F3A, con menor presencia en el frente, corresponde únicamente a una anomalía estadística, producida por la acumulación de material en una zona aislada, demostrando que la presencia de hormigón proyectado en el modelo puede llegar a forzar falsas identificaciones. Por otro lado, el plano F3B, pese a guardar cierto grado de repetitividad a lo largo del frente, siempre aparece asociado a superficies irregulares de roca, por lo tanto, su origen se relaciona con la generación de planos “artificiales” durante el proceso de voladura. De este modo, los únicos planos que responden al patrón propio de una familia de discontinuidad “natural” (repetitividad y rugosidad real) son los que corresponden a la familia principal F3.

Notar que, aunque este plano (52/30) represente la máxima diferencia angular ( $\delta = 34^\circ$ ) en comparación con los resultados manuales proporcionados por DIPS (340/29), es posible observar que es la única familia que aflora en una superficie “sana” sin presencia de hormigón proyectado, situada en una zona elevada ( $> 2$  m) –próxima a la corona del túnel– donde es más difícil la posiciónar la brújula. Por lo tanto, estas diferencias angulares están justificadas por las propias dificultades asociadas a la adquisición de medidas manuales “representativas” en este sector.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Por último, este mismo análisis se ha repetido en el sector circundante a la familia principal F1 (227/82), con el objetivo de determinar el verdadero origen de los posibles planos secundarios: F1A (224/85) y F1B (251/76). Para ello, se ha seleccionado una pequeña porción del modelo 3D, donde es posible observar con claridad una superficie de discontinuidad “natural” asociada a la familia vertical F1; estableciendo una comparación visual entre una fotografía “real” efectuada en campo y la proyección tridimensional de los tres planos identificados en DSE (F1, F1A y F1B) superpuestos sobre la nube de puntos de alta densidad generada en Agisoft Metashape (Figura 28). Concluyendo finalmente que ninguno de los dos planos (F1A y F1B) se corresponde con un plano de discontinuidad real, sino que su auténtico origen es debido al efecto “distorsionador” que produce el hormigón proyectado al adherirse a la superficie de la familia F1. Siendo F1A una variación artificial de F1 y F1B un plano asociado a las zonas de intersección.

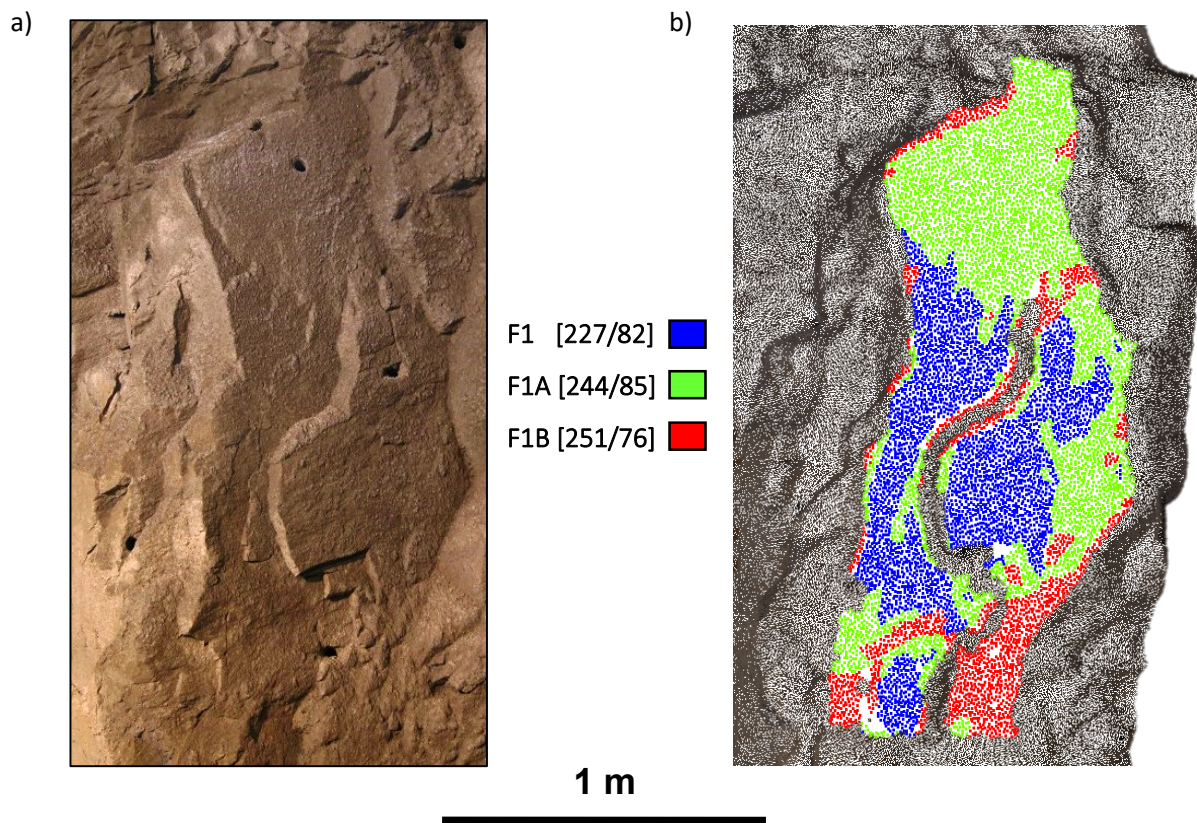


Figura 28. a) Fotografía de campo de una región del Túnel 1 donde aflora la discontinuidad F1; b) Distribución espacial de los planos de discontinuidad F1, F1A y F3B identificados con DSE en el Túnel 1, proyectados sobre la nube de puntos correspondiente a la misma región.

### 3.4.2. Resultados del Túnel 2

La Figura 29 y la Tabla 7 muestran los resultados de los análisis realizados con DSE para la identificación de las familias de discontinuidad presentes en el Túnel 2. La nube de puntos de alta densidad de la Región de Interés (ROI) se generó y recortó en Agisoft Metashape a partir de las 206 fotografías realizadas en el frente de excavación del túnel.

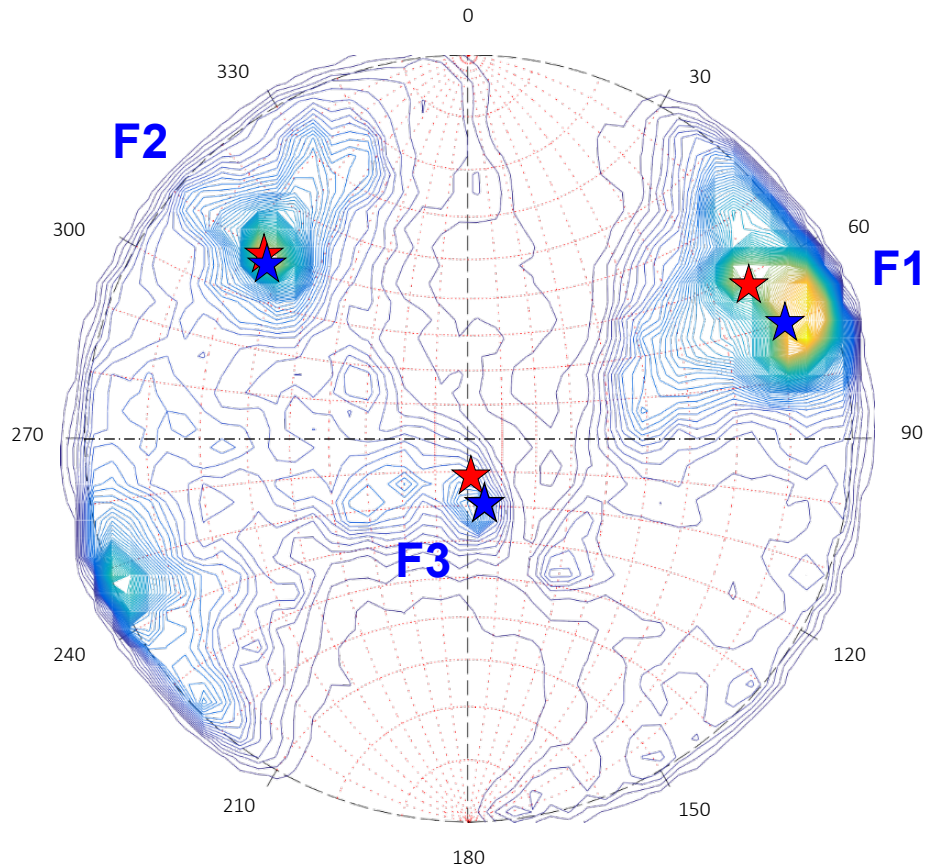


Figura 29. Diagrama de densidad de polos (vectores normales) en proyección estereográfica y polos principales identificados en DSE: F1 (249/82), F2 (132/73) y F3 (352/19) de entre todos los planos de discontinuidad presentes en el Túnel 2 (estrellas azules) y resultados manuales (estrellas rojas).

Tabla 7. Orientaciones representativas proporcionadas por DSE a partir del análisis de la Región de Interés (ROI) del Túnel 2.

Familias de discontinuidad	Plano		Normal			% Sobre el total de puntos
	Dip [°]	Direction	Dip [°]	Trend [°]	$\alpha$ Plunge [°]	
F1	249	82	69	8	7,60	
F2	132	73	312	17	6,05	
F3	352	19	172	71	1,07	

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Al igual que en el Túnel 1, se identificaron tres familias de discontinuidad principales en el Túnel 2: dos sub-verticales conjugadas (F1 y F2) y una sub-horizontal (F3). Los resultados de la Tabla 8 muestran que, de nuevo, el enfoque tradicional de DIPS –basado en las mediciones manuales realizadas con brújula– y el enfoque fotogramétrico –basado en el análisis realizado en DSE– proporcionan resultados muy similares, con diferencias angulares máximas de 9°, 2° y 9°, para las familias F1, F2 y F3, respectivamente (Notar que, de nuevo, estas diferencias angulares están dentro del rango de error asociado a las mediciones manuales.)

Tabla 8. Diferencias de orientación entre las familias principales identificadas por DIPS (a partir de las medidas manuales efectuadas con brújula) y las orientaciones representativas (principales) proporcionadas por DSE en la Región de Interés (ROI) del Túnel 2.

Familias de discontinuidad	DIPS		DSE			Diferencia	
	Dip [°]	Direction	Dip [°]	Dip [°]	Direction	Dip [°]	$\delta$ [°]
F1	240		79	249		82	9
F2	131		71	132		73	2
F3	4		10	352		19	9

No obstante, hay que tener en cuenta que, a diferencia del Túnel 1, estos resultados no se ven afectados por las mismas dificultades de identificación asociadas a la medición de la familia sub-horizontal F3; debido principalmente a la menor presencia de hormigón proyectado en el frente de excavación del Túnel 2. Por lo tanto, es lógico que en esta ocasión los resultados obtenidos (en términos de diferencias angulares) estén por debajo de las diferencias máximas (34°) obtenidas en el Túnel 1.

El estudio visual del Túnel 2 se desarrolló en dos fases simultáneas: una inicial (i) general, en la cual se analizó el modelo 3D en su totalidad, confirmando los resultados manuales obtenidos con brújula (identificando tres familias principales: F1, F2 y F3); y una secundaria (ii) en detalle, realizada en 1/3 de la nube de puntos de alta densidad, ubicada en la zona superior del frente, dando como resultado la caracterización de una nueva familia de discontinuidad (secundaria) asociada a la familia principal F2, denominada F2B, que no había sido detectada con anterioridad en el primer análisis realizado en DIPS.

A continuación, se incluye una descripción de los diferentes pasos realizados para la determinación de esta nueva familia (F2B) a partir del análisis visual (tridimensional) efectuado en la nube de puntos (ROI) del Túnel 2.

En primer lugar, al igual que en el caso anterior, se procedió a visualizar conjuntamente los resultados proporcionados por DSE en superposición con la nube de puntos de alta densidad (ROI) generada en Agisoft Metashape (Figura 30).

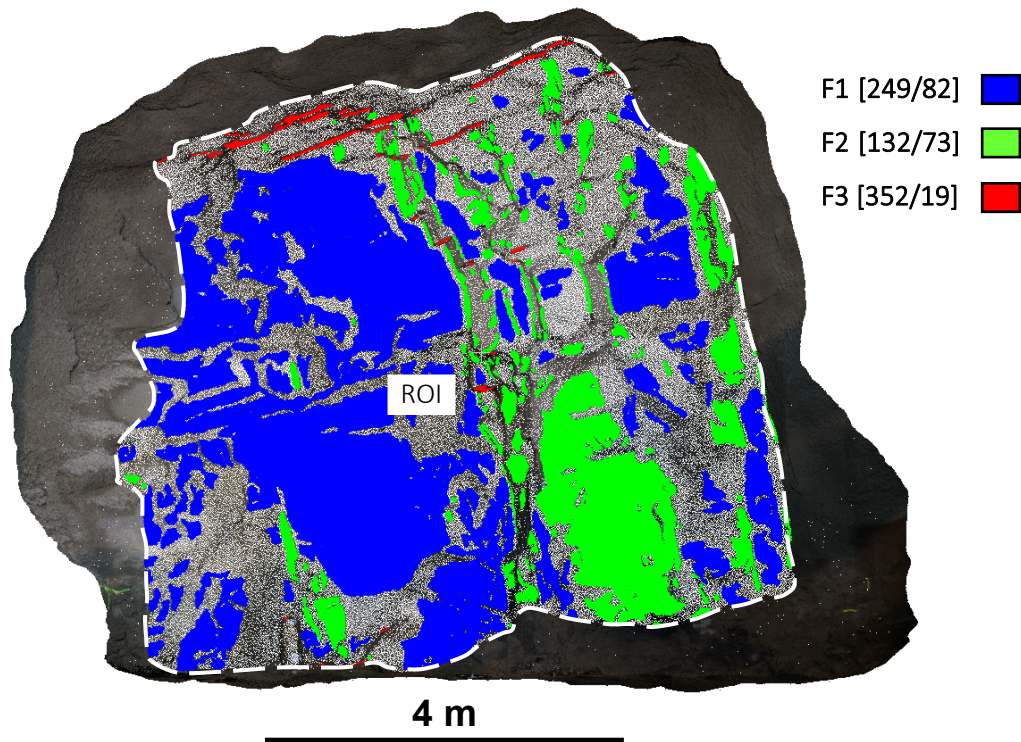


Figura 30. Distribución espacial de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2 y F3) identificadas por DSE en el Túnel 2, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.

A partir de su visualización, es posible observar (como era de esperar) un buen grado de ajuste entre los resultados proporcionados por DSE y la realidad: donde las familias verticales (F1 y F2) se adaptan correctamente a las superficies de discontinuidad que afloran en la parte inferior del frente, mientras que la familia sub-horizontal (F3) aflora con claridad en la parte superior del frente, donde la presencia de hormigón proyectado impide su acumulación.

Sin embargo, en la zona superior derecha del frente, donde es posible observar varios bloques de “roca sana” sin evidencias de meteorización (que debería de facilitar la confirmación visual de los resultados obtenidos), se observó que la familia vertical F2 no aparecía correctamente representada (Figura 31). Por lo tanto, se decidió “aislar” esta sección de aproximadamente 20 m<sup>2</sup>, recortando la nube de puntos, y proceder a la realización de un segundo análisis en DSE para estudiar los motivos de su ausencia.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

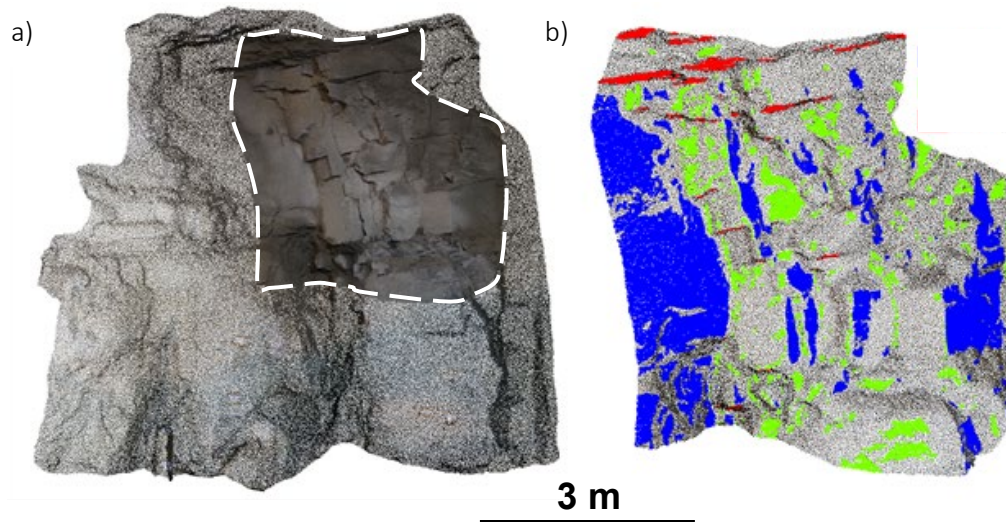


Figura 31. Detalle de la zona superior del frente del Túnel 2 donde afloran varios bloques de roca: a) Modelo de detalle de la sección; b) Imagen ampliada de la distribución de los planos F1, F2 y F3 en esta región. (Notar que, la familia F2 (en verde) no aparece correctamente representada alrededor de los bloques.)

DSE identificó dos conjuntos principales de discontinuidades para esta sección: F2A (131/84) y F2B (157/77). F2A corresponde al conjunto F2 mostrado en la Sección 3.3.4, pero con un ligero aumento del ángulo de buzamiento (132/73 frente a 131/84); y F2B corresponde a dos medidas de brújula (con orientaciones de 158/82 y 154/84), que se descartaron inicialmente cuando se caracterizó F2 (ver Figura 22 para más información). Las diferencias angulares entre las orientaciones obtenidas con DSE y las calculadas con DIPS para los conjuntos de discontinuidades F2A y F2B son, respectivamente, 2° y 6°.

Por lo tanto, una vez realizado este segundo análisis, se decidió introducir esta nueva familia F2B “manualmente” dentro del primer análisis realizado en el modelo total, y proceder de nuevo a su visualización conjunta en el software CloudCompare, confirmando su incorporación.

La Figura 32 muestra las posiciones de los planos pertenecientes a estas cuatro familias (F1, F2A, F2B y F3) dentro de la nube de puntos (ROI) del Túnel 2. En esta ocasión, se puede observar que el conjunto F2A (en verde en la Figura X) se distribuye homogéneamente a lo largo del frente de excavación; estando de nuevo bien representado en la parte inferior del túnel, donde es posible realizar mediciones con brújula. Sin embargo, el conjunto F2B (en amarillo) aparece principalmente en la parte superior (alrededor de la zona de bloques), mientras que su aparición en la zona baja del túnel es muy escasa; justificando el hecho de que sólo se realizaran dos mediciones manuales durante la campaña de campo.

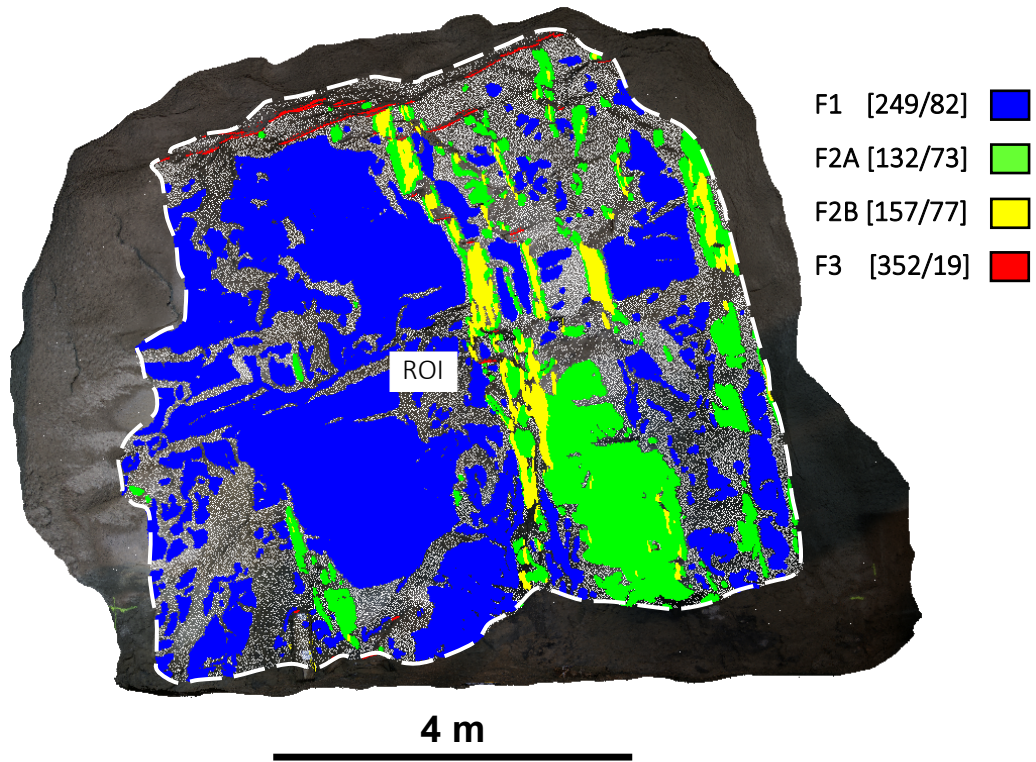


Figura 32. Distribución espacial fina, de los planos de discontinuidad de las familias principales (F1, F2A, F2B y F3) identificadas por DSE en el Túnel 2, proyectadas sobre la nube de puntos original (ROI) generada en Agisoft Metashape.

### 3.4.3. Análisis del número de imágenes

Una de las principales incertidumbres a la hora de emplear la técnica fotogramétrica SfM para la caracterización remota de macizos rocosos es el número mínimo de imágenes necesarias para la generación de los modelos 3D. Si bien es cierto que un ligero aumento en el número de imágenes favorece, en la mayoría de los casos, la generación de nubes de puntos más sólidas (con mayor densidad de puntos) y precisas, esta práctica también conlleva un aumento muy significativo de los tiempos de procesado, aumentando a su vez el tamaño de los modelos. Además, al trabajar con un número muy elevado de imágenes aumentan las posibilidades de incluir en el análisis imágenes de baja calidad que pueden disminuir enormemente la calidad de los resultados (Russel 2016).

Por lo tanto, en esta sección se ha tratado de analizar la influencia que tiene el número de imágenes en la calidad de los resultados finales (y en particular, en los conjuntos de discontinuidad identificados para cada túnel), comparando la evolución de las diferencias (DIPS vs DSE) al reducir secuencialmente el número de imágenes empleadas para la generación de los modelos 3D de los Túneles 1 y 2.

Para ello, en primer lugar, se analizó el número mínimo de fotografías necesarias para cubrir la totalidad de los frentes de ambos túneles. A partir de los modelos originales (169 y 206 fotografías) y con la ayuda del programa Agisoft Metashape se sectorizó cada uno de los frentes en base a una malla normalizada con una luz de 2 x 2 m. Una vez efectuada la división, se analizaron por separado cada una de las partes, escogiendo entre todo el conjunto de datos, las imágenes con mayor calidad. (Notar que, se ha decidido emplear este enfoque, suponiendo que la calidad de las fotografías mejorará cuando disminuya su número, ya que se puede dedicar más tiempo y cuidado su adquisición.) Una vez analizados ambos frentes, se determinó que el número mínimo para cubrir satisfactoriamente ambos frentes es de 13 imágenes. De este modo, se generaron 8 sub-modelos (combinando las diferentes posiciones de cámara) aumentando secuencialmente el número de imágenes (desde 13 hasta 142-137 fotografías).

La Figura 33, muestra la evolución de las diferencias angulares ( $\delta$ ) entre los conjuntos de discontinuidad obtenidos con DSE y DIPS, en función del número de fotografías empleadas para la generación de los nuevos modelos 3D. Estas diferencias se mantienen casi constantes (y siempre inferiores a 10°) para las familias F1 y F2 en ambos túneles; mientras que las diferencias para la familia F3 tienden a aumentar (aunque no de manera continua) a medida que disminuye el número de fotografías, alcanzando diferencias de hasta 45° en el Túnel 1 y 15° en el Túnel 2. Estos peores resultados se pueden atribuir a la orientación de F3 (que se distribuye de manera sub-paralela a la visual y sub-horizontal) y a la presencia de hormigón proyectado acumulado en sus planos.

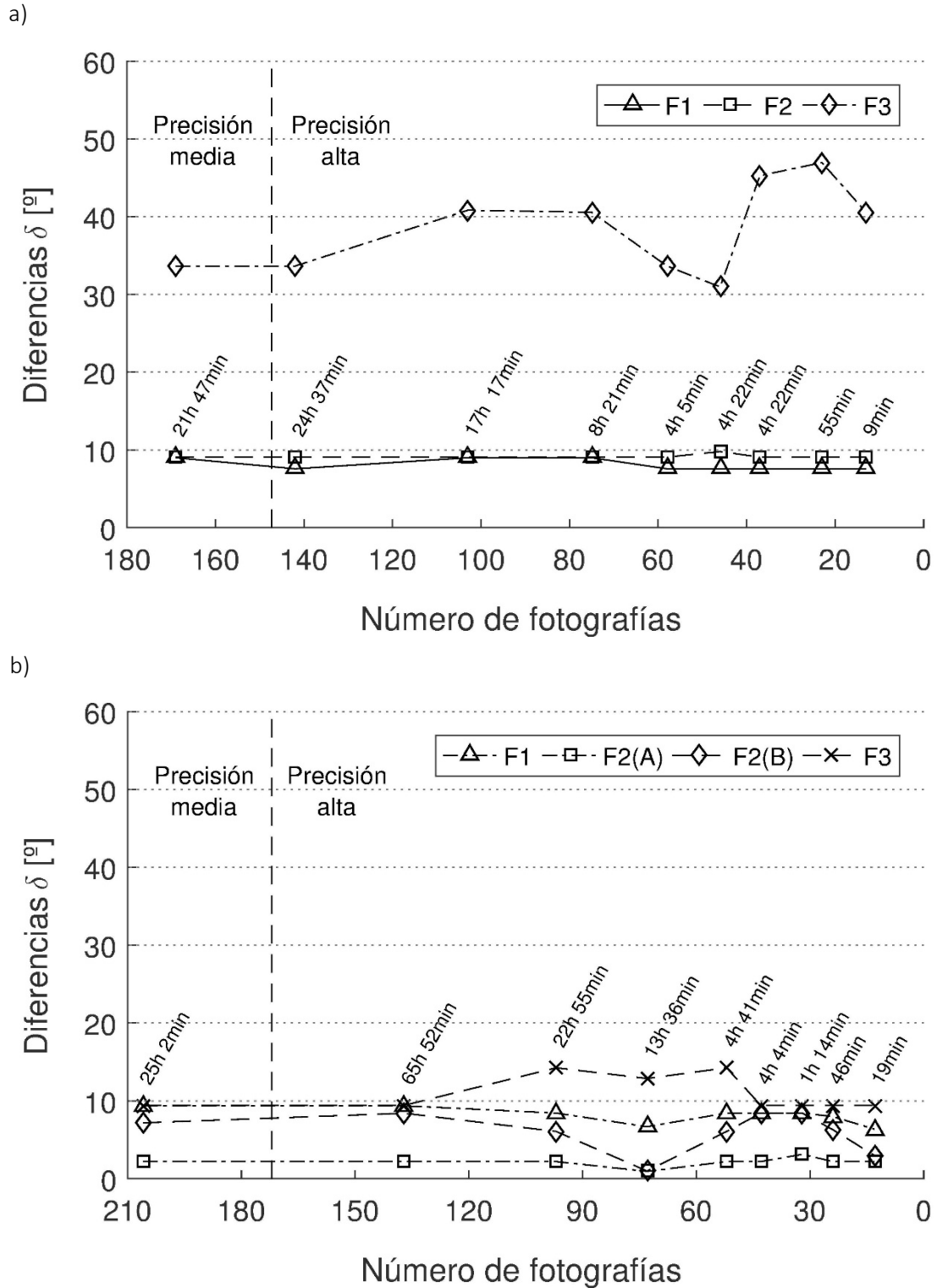


Figura 33. Evolución, a medida que se reduce el número de fotografías utilizadas para construir el modelo fotogramétrico, de las diferencias angulares ( $\delta$  [°]) entre las orientaciones de las familias de discontinuidad extraídas con DSE de la nube de puntos de alta densidad y las calculadas con DIPS en base a las mediciones manuales con brújula: a) Túnel 1; b) Túnel 2.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real

Los resultados mostrados en la Figura 33 permiten proponer una reducción significativa en el número de fotografías empleadas para la generación de los modelos 3D, con una reducción significativa del tiempo de procesado. Por ejemplo, los modelos iniciales empleando todas las imágenes (169 para el Túnel 1 y 206 para el Túnel 2) requirió de tiempos de cálculo de 22 y 25 horas respectivamente; mientras que los modelos construidos con 13 fotografías requieren 9 minutos para el Túnel 1 y 19 minutos para el Túnel 2. Además, esta reducción en los tiempos de cálculo ha permitido incrementar los “niveles de computación” del programa durante la generación de las nubes de puntos iniciales (DPC) y finales (HDPC); generando modelos con mayor presión y calidad.

Estas observaciones nos llevan a apuntar que, en contra de la creencia general en esta área, una reducción en el número de fotografías empleadas para la generación del modelo fotogramétrico puede llevar asociada un aumento en la precisión del mismo, siempre que (i) el número de imágenes sea el suficiente para cubrir correctamente el área analizada, y (ii) las fotografías tengan la calidad adecuada. En otras palabras, podría ser mejor trabajar con menos fotografías de mejor calidad que con más de peor calidad, ya que al aumentar el número de fotografías es más probable que se introduzca imágenes de peor calidad (< nitidez) que incorporen “ruido” en los modelos. Esto se reflejó en nuestros modelos iniciales de los Túneles 1 y 2, en los cuales el Túnel 2 tuvo una mayor cantidad de fotos (206 frente a 169) y un gran error (ver Tabla 3). Este hecho se confirma con la observación de que el error promedio del modelo generado en el Túnel 2 (es decir, el promedio de los valores mostrados en la Tabla 3) disminuye cuando se reduce el número de fotografías empleadas, desde 13,6 mm (206 fotografías y calidad media) a 1,0 mm (13 fotografías y calidad media) o a 0,8 mm (13 fotografías y alta calidad). En el Túnel 1, el error promedio aumenta ligeramente, de 0,2 a 0,4 mm, aunque hay que tener en cuenta que el error es muy pequeño en ambos casos.



## 4. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

### 4.1. Introducción

Entre los diversos factores que afectan a la resistencia al corte de las juntas, como el relleno o la resistencia de las paredes, destaca el efecto de la rugosidad, que se convierte en unos de factores principales en los diferentes criterios de resistencia de las juntas (e.g., Patton 1966; Barton y Choubey 1977).

Existen diversos métodos para cuantificar la rugosidad de una junta, a partir de los cuales, y mediante los parámetros calculados, se puede determinar su resistencia. Estos métodos se pueden dividir en tres grandes grupos: (i) empíricos, como el coeficiente JRC o los utilizados en las clasificaciones geomecánicas (e.g., Barton 1973; Barton y Choubey 1977); (ii) estadísticos, como la rugosidad media aritmética (e.g., Maerz y Franklin 1990); y (iii) los que consideran el perfil de rugosidad como un fractal (e.g., Ge et al. 2014).

En las aplicaciones prácticas destaca el JRC (Joint Roughness Coefficient), que se emplea en el criterio de rotura para discontinuidades de Barton y Choubey (1977). Como es conocido, este coeficiente toma valores entre 1 y 20 y su determinación se hace mediante la comparación del perfil estudiado con un conjunto de perfiles tipo. Aunque mediante el JRC se pueden replicar adecuadamente los resultados de ensayos de corte en el laboratorio, se trata de un método subjetivo, puesto que diferentes observadores pueden determinar diferentes valores para un mismo perfil (Hsiung et al. 1993; Beer et al. 2002). Por esta razón, son abundantes los trabajos que tratan de correlacionar el JRC con otros parámetros estadísticos que se pueden calcular de manera objetiva (e.g., Tse y Cruden, 1979; Yu y Vayssade, 1991); caracterizando la rugosidad con enfoques fractales (e.g., Li y Huang, 2015; Stigsson y Ivars 2019) o empleando un análisis de frecuencias espectrales (e.g., Chae et al. 2011; Zou et al. 2015).

Una de las principales ventajas de estas técnicas es que diferencian entre la macro-rugosidad (a gran escala (dm – m); también denominada ondulación) y la micro-rugosidad (a menor escala (mm – cm); también denominada irregularidad o rugosidad de segundo orden); ya que el comportamiento de la junta es controlado por ondulación o rugosidad dependiendo de la tensión normal o el desplazamiento de corte (ISRM 1978). En este

sentido, otros enfoques que caracterizan la rugosidad empleando un único parámetro, son incapaces de tener en cuenta estas diferencias (Yang et al. 2001).

En este capítulo se presenta una metodología para cuantificar la rugosidad de las juntas (a ambas escalas) utilizando las frecuencias espectrales de su perfil. Aunque dicho perfil teóricamente puede capturarse utilizando cualquier técnica que proporciona perfiles continuos de la superficie de roca (por ejemplo, láser escáner (LiDAR), perfilómetros o medidores de contorno) nos centramos en las técnicas remotas de caracterización 3D que nos permiten analizar la rugosidad de la junta a partir de modelos digitales 3D de alta calidad basados en fotogrametría y procesamiento digitales de imágenes (Unal y Unver 2004). Estas técnicas se han aplicado tanto en laboratorio (Wernecke y Marsch 2015) como en campo (Tatone y Grasselli, 2013), a muestras de roca (Wernecke y Marsch 2015) y suelo (Marzahn et al. 2012), empleando fotogrametría convencional y sensores topográficos avanzados. Sin embargo, solamente Wernecke y Marsh (2015) emplean la técnica Structure from Motion para la obtención de perfiles de rugosidad (y su posterior clasificación acorde al índice JRC) en condiciones de laboratorio, comparando los resultados obtenidos con SfM con otras técnicas ópticas de difícil acceso (escáner 3D de luz estructurada). No obstante, estos autores no describen en profundidad el sistema de adquisición empleado, y aspectos propios de la técnica como el número de imágenes, la posición de la cámara, el grado de superposición o las referencias instaladas no son analizados; dificultando de este modo, la posibilidad de replicar dichos ensayos por el resto de la comunidad científica.

En concreto, en este capítulo se emplea la técnica SfM a corta distancia para la generación de nubes de puntos de alta densidad con la precisión suficiente para extraer varios perfiles de rugosidad en muestras de laboratorio; describiendo la metodología empleada para la adquisición de las fotografías. A continuación, se obtienen las frecuencias espectrales de dichos perfiles y se aproximan mediante funciones matemáticas (exponenciales o rectas) que permiten definir los perfiles de rugosidad utilizando sólo unos pocos parámetros. La metodología desarrollada se demuestra finalmente utilizando dos muestras de granito.

## 4.2. Metodología SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

La Figura 34 presenta un diagrama de flujo de la metodología seguida en este capítulo para el análisis de la rugosidad en muestras de laboratorio a partir de modelos 3D obtenidos mediante la técnica SfM y análisis espectrales. Como se puede observar, el flujo de trabajo consta de 6 pasos principales: (i) adquisición de imágenes en laboratorio empleando un set de fotografía macro que permite la realización de fotografías de manera rápida y sencilla (desde varios ángulos); (ii) generación de nubes de puntos 3D; (iii) extracción de los perfiles de rugosidad ( $L=100$  mm); (iv) obtención del coeficiente JRC a partir del parámetro estadístico  $Z_2$ ; (v) análisis espectral a partir de la parametrización del espectro empleando varios enfoques; y (vi) obtención del clasificador JRC a partir de la comparación entre la información estadística y espectral obtenida de los perfiles. En las siguientes secciones se mostrará información detallada sobre cada uno de estos pasos.

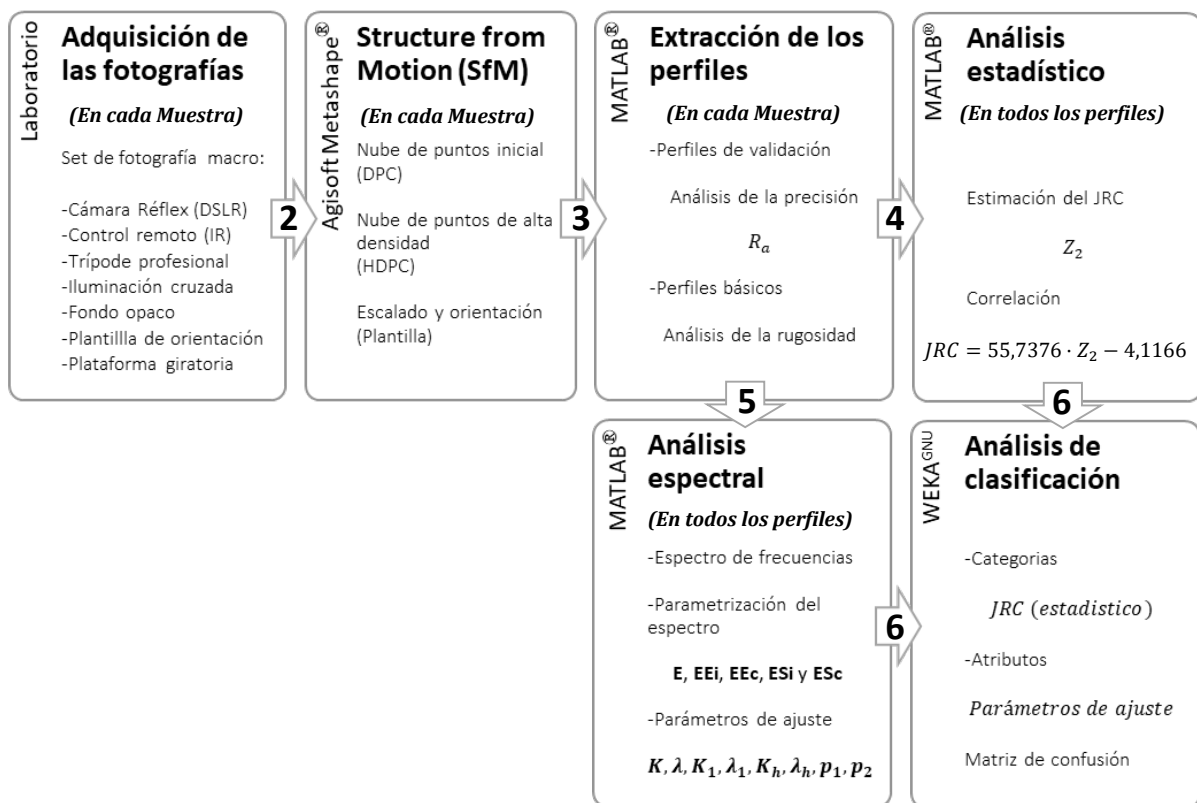


Figura 34. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la rugosidad de en muestras de laboratorio empleando la técnica SfM a corta distancia.

## 4.3. Aplicación de la metodología SfM

### 4.3.1. Descripción de las muestras

Las muestras seleccionadas para la realización de este estudio fueron obtenidas de un bloque de granito de grano fino – medio (tamaño medio de los cristales comprendido entre 1 – 5 mm), de 300 mm de alto x 150 mm de ancho x 700 mm de largo, empleado anteriormente en laboratorio para la realización de ensayos a compresión (Figura 35).



Figura 35. Bloque de granito empleado para la adquisición de las muestras.

A continuación, para facilitar su manipulación y transporte, se seleccionaron y cortaron dos de sus caras con la ayuda de una sierra de widia (Figura 36).

De este modo, se crearon dos “pastillas” de roca con dos superficies bien definidas: (i) una superficie rugosa en su parte superior y (ii) una superficie horizontal en su parte inferior; la primera (i) representa un corte natural –fresco y sin síntomas de alteración– donde es posible observar la rugosidad principal de la muestra y la segunda (ii) nos ayuda a generar un plano horizontal de apoyo que nos permite estabilizar la muestra a la hora de realizar las fotografías.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance



Figura 36. Segmentación del bloque original.

Por último, para igualar ambas superficies, se decidió emplear la misma sierra de widia para perfilar sus contornos (Figura 37). De este modo, las bases de las dos muestras (Muestra 1 y Muestra 2) comparten las mismas dimensiones:  $120\text{ mm}$  de ancho x  $200\text{ mm}$  de largo; difiriendo únicamente en su altura, la cual es función de su grado de rugosidad.



Figura 37. Perfilado de las muestras.

### 4.3.2. Puntos de control

Como ya se ha comentado en el anterior Capítulo, la técnica SfM genera modelos 3D sin escala ni orientación. Sin embargo, como la finalidad del presente estudio es efectuar un análisis de la rugosidad en muestras de roca a partir de un modelo digital, es estrictamente necesario que dicho modelo respete la escala real del objeto.

En esta ocasión, se ha diseñado una nueva Plantilla de Orientación 3.0, impresa en cartulina, que nos ayudará a definir un sistema de referencia rectangular alrededor de las muestras (Figura 38).

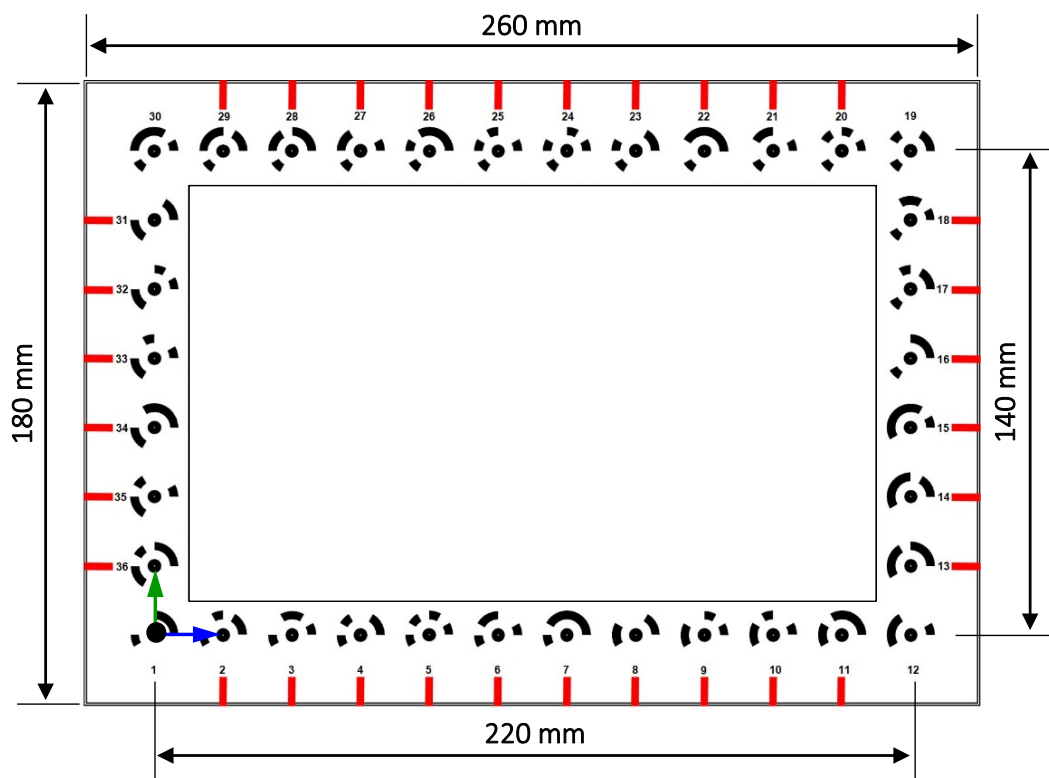


Figura 38. Diseño y dimensiones de la Plantilla 3.0 empleada en este estudio.

Esta Plantilla, tiene unas dimensiones totales de 180 mm de ancho x 260 mm de largo, superior al tamaño de las muestras (120 mm x 200 mm), e incluye en su interior un sistema de referencia rectangular de 140 mm de ancho x 220 mm de largo, formado por 38 GCPs. Estos puntos, han sido distribuidos a lo largo del perímetro del rectángulo con una separación constante “entre sí” de 20 mm (Notar que, de nuevo, para facilitar su identificación en las fotografías, se han vuelto a emplear las dianas codificadas proporcionadas por el programa Agisoft Metashape para ubicar la posición de los 38 GCPs incluidos en la Plantilla.)

De este modo, como la distancia entre puntos es conocida, es posible emplear esta información para: (i) escalar correctamente el modelo y (ii) generar un sistema de referencia horizontal ( $x - y$ ) que nos servirá de ayuda a la hora de establecer la posición 3D de los perfiles de rugosidad. De manera adicional, se han introducido unas pequeñas marcas de referencia en el contorno de la Plantilla (segmentos de color rojo en la Figura 38) que nos ayudarán a establecer la posición (inicial y final) de los 16 perfiles de validación que serán empleados para analizar la precisión de los modelos 3D generados (ver Sección 4.4.1 para más información).

Por último, con el objetivo de generar un punto de apoyo en la parte inferior de la muestra, que nos permita su rotación, se ha decidido superponer el conjunto (Muestra + Plantilla) sobre una “Plataforma giratoria” fabricada en MDF (Medium Density Fibreboard); esto nos ayudará a evitar posibles deformaciones de la Plantilla durante el proceso de adquisición de las fotografías (Figura 39).

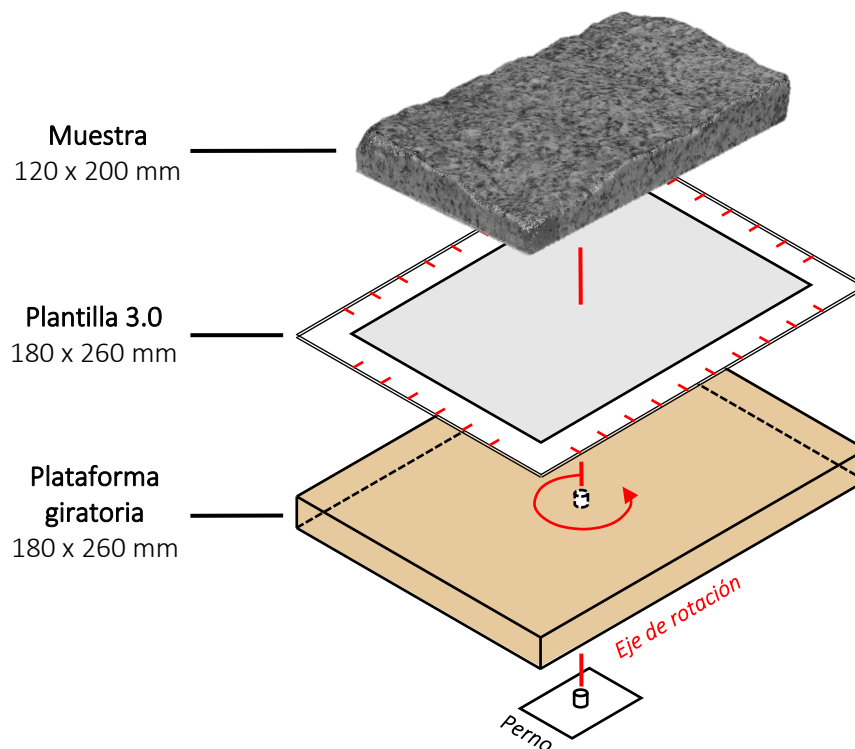


Figura 39. Configuración final de las muestras ensayadas.

Por lo tanto, el aspecto final de las Muestras 1 y 2 (Figura 40 y Figura 41) estará formado por la conjunción de los siguientes elementos: (i) Muestra de roca, (ii) Plantilla de Orientación y (ii) Plataforma giratoria. (Notar que, para evitar posibles movimientos entre las partes, y asegurar la estabilidad del conjunto, estos elementos han sido unidos “entre sí” con la ayuda de un adhesivo en spray).

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance



Figura 40. Muestra 1.

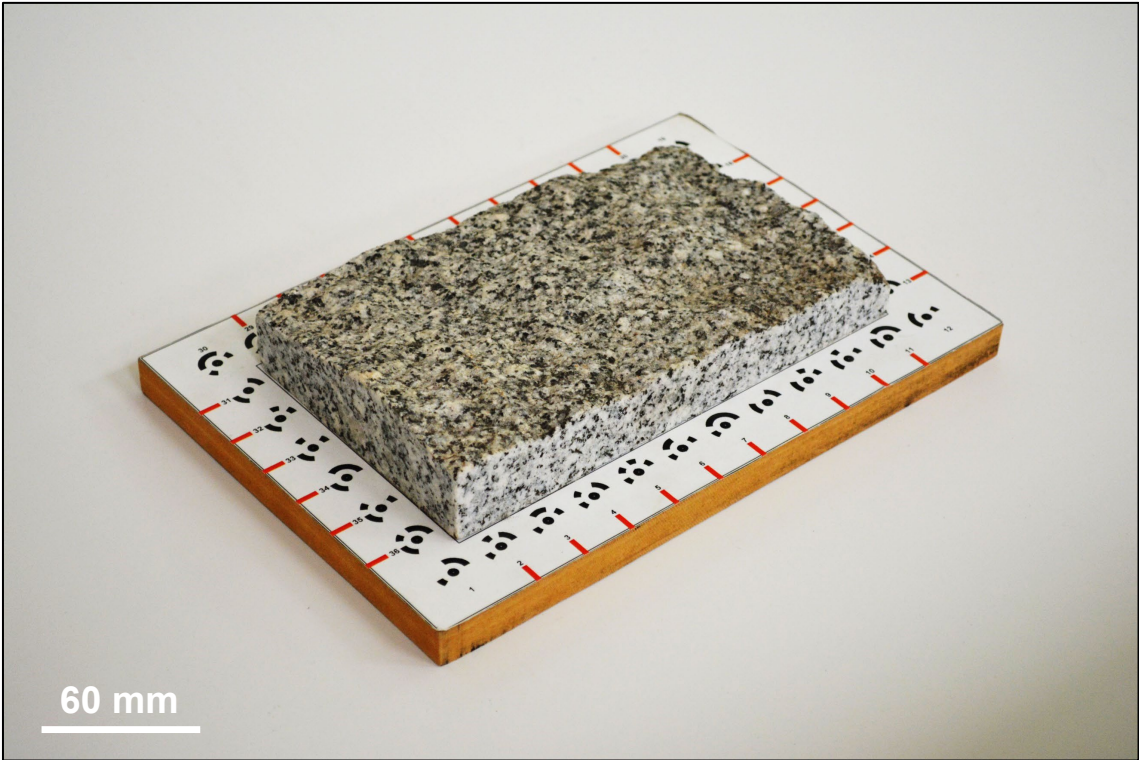


Figura 41. Muestra 2.

### 4.3.3. Adquisición de las imágenes

Para la adquisición de las fotografías, en esta ocasión, se ha empleado una cámara digital réflex de alta resolución (24 MP) modelo Nikon D5200 (tamaño de imagen 6000 x 4000) montada junto al objetivo NIKKOR AF-S DX 18 – 55 mm f/3,5 – 5,6 G VR (distancia focal equivalente al formato de 35 mm: 27 – 82,5 mm) (ver Figura 42).

Notar que, a diferencia del capítulo anterior (identificación y análisis de discontinuidades en túneles), en este apartado analizaremos la rugosidad de las superficies de roca; por lo tanto, la calidad y la precisión de los modelos 3D generados deberá de ser lo suficientemente elevada como para ser capaces de identificar pequeños cambios (de orden milimétrico) en los planos fotografiados. En este sentido, un aumento en la resolución del equipo fotográfico (24 MP frente a 10,2 MP) nos ayudará a aumentar drásticamente el número de píxeles presentes en las imágenes, facilitando al programa la labor de identificación de puntos homólogos, elevando la densidad y precisión de las nubes de puntos generadas.



Figura 42. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Nikon D5200+18–55 mm.

Asimismo, para facilitar la toma de datos y asegurar la estabilidad del sensor a la hora de efectuar las fotografías, evitando la obtención de imágenes desenfocadas, la cámara se instaló sobre un trípode profesional (modelo MT055XPRO3 de Manfrotto) de peso elevado (2,5 kg) y altura regulable (máx. – mín.: 170 – 9 cm). De nuevo, para eliminar posibles vibraciones en el momento del disparo, la cámara fue activada por control remoto con la ayuda de un pequeño mando inalámbrico.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

Además, con el objetivo de mejorar las condiciones ambientales durante la adquisición de las fotografías y evitar la generación de pequeñas sombras sobre la superficie de la muestra, se ha decidido utilizar (junto a la iluminación del propio laboratorio) dos focos (Figura 43) que iluminen la muestra desde dos posiciones opuestas entre sí. A su vez, para facilitar la labor del programa Agisoft Metashape a la hora de identificar puntos en común entre las fotografías y eliminar toda la información innecesaria de la escena, se ha decidido instalar un fondo opaco empleando unas cartulinas de color negro situadas tras la muestra a modo de pequeño ciclorama.



Figura 43. Set de fotografía macro empleado para la adquisición de las fotografías.

Como su propio nombre indica “Structure from Motion”, el éxito de la técnica SfM radica en la obtención de grandes conjuntos de imágenes tomadas desde el mayor número posible de posiciones “moviendo” nuestro dispositivo alrededor del objeto a retratar. Sin embargo, en este caso, para ayudarnos a agilizar y optimizar el proceso de la toma de datos (eliminando posibles errores acumulados por el desplazamiento alrededor de la muestra), se ha decidido invertir el orden: mantener el sensor fotográfico en una posición fija y mover –en su lugar– el objeto de estudio (muestra) frente a la cámara.

Para ello, se ha decidido instalar bajo la muestra un pequeño perno (anclado sobre una mesa de madera) a modo de eje de rotación, sobre el que se instaló la plataforma giratoria (ver Figura 39); permitiendo que esta gire libremente 360° mientras es fotografiada (desde varios ángulos) por una única cámara situada siempre en la misma posición.

Finalmente, se realizaron un total de 220 fotografías (110 por muestra) desde tres posiciones de cámara diferentes (variando el ángulo de inclinación del objetivo con respecto a la posición de la muestra) efectuando –con la ayuda de la plataforma giratoria– tres barridos consecutivos de 360°, adquiriendo imágenes dobles en intervalos aproximados de 10° (Figura 44).

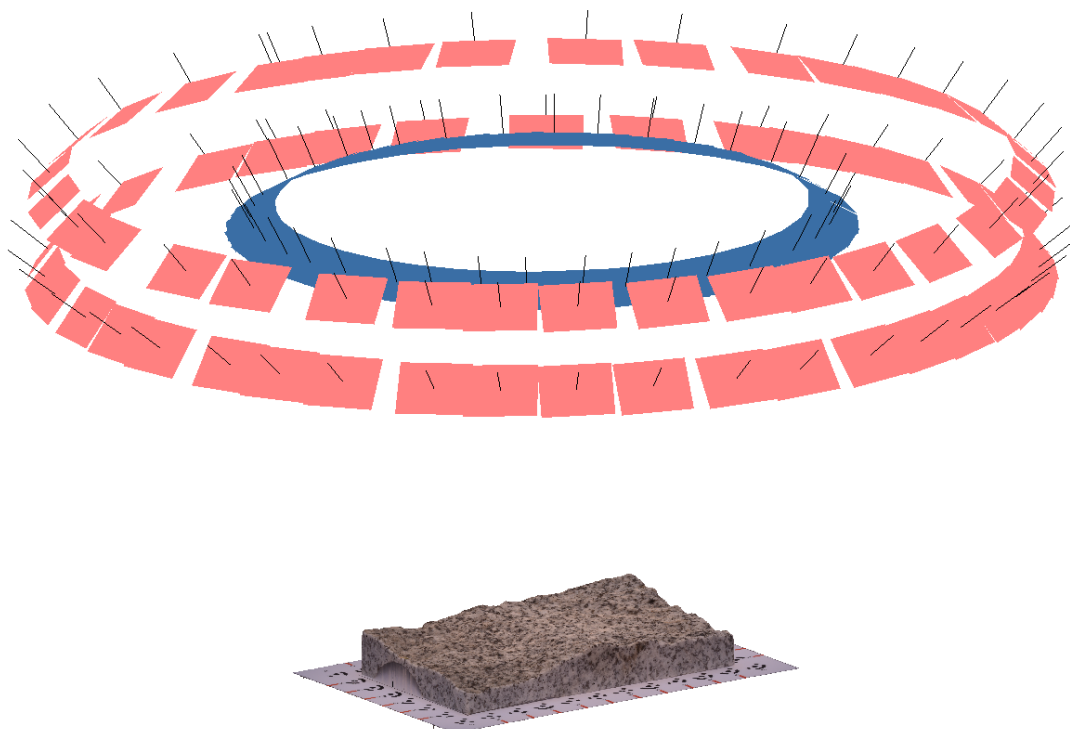


Figura 44. Posiciones de cámara (en rosa y azul) de las fotografías realizadas en la Muestra 1. (Los diferentes colores indican las diferentes distancias focales empleadas: rosa para las distancias mayores (22 mm) y azul para las inferiores (20 mm).)

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

Todas las fotografías han sido realizadas empleando una distancia focal fija para cada uno de los barridos, ajustando los parámetros de la cámara en función de las condiciones de iluminación presentes en el set (ver Tabla 9). De este modo, al ajustar la distancia focal en función de la posición que ocupa la cámara (inclinación del objetivo), aseguramos que el encuadre de las muestras se mantiene constante, mostrando siempre la misma proporción de muestra en todas las imágenes (Figura 45 y Figura 46).

Tabla 9. Ajustes de cámara.

Modelo	Distancia media Cámara/Muestra [cm]	Fotos [N°]	Ajustes de cámara		
			Distancia focal [mm]	Apertura [f/]	Velocidad de obturación["]
Muestra 1	39	36	20	25	1/1,3
		74	22		
Muestra 2	44	68	26	29	2
		42	38	32	

En particular, todas las fotografías han sido adquiridas con la máxima resolución disponible en nuestro dispositivo (24 MP) y con los siguientes ajustes de configuración prefijados antes de disparar: Modo manual (M), Enfoque manual (MF), Medición ponderada al centro, Balance de blancos manual, Estabilizador desactivado, Apertura  $f/25 - 32$ , Velocidad de obturación  $< 2''$  y ISO 100.

Del mismo modo que en el Capítulo 3, estos parámetros han sido definidos antes de iniciar la toma de imágenes (después de la realización de varias pruebas) con el objetivo de buscar la configuración “óptima” del dispositivo capaz de homogeneizar el enfoque sobre toda la superficie de las muestras (ampliando al máximo la profundidad de campo), asegurando, de este modo, la obtención de imágenes perfectamente nítidas con el mayor grado de detalle posible.

En este sentido, se reduce al mínimo el número de operaciones entre fotografías; simplemente tendremos que: (i) rotar la muestra (con la ayuda de la plataforma giratoria) y (ii) efectuar el disparo (con la ayuda del mando inalámbrico). Por lo tanto, el uso de la plataforma giratoria diseñada en el presente trabajo nos proporcionó un gran ahorro de tiempo a la hora de tomar los datos. En total, solamente fueron necesarios 10' para preparar y fotografiar cada una de las muestras; donde la mitad de ese tiempo (5') se dedicó a definir y a ajustar los parámetros de la cámara.



Figura 45. Imagen de ejemplo de uno de los barridos (inferior) realizados en la Muestra 2:  
Distancia focal 26 mm; Apertura  $f/29$ .



Figura 46. Imagen de ejemplo de uno de los barridos (superior) realizados en la Muestra 2:  
Distancia focal 38 mm; Apertura  $f/32$ .

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

#### 4.3.4. Caracterización manual de los perfiles de rugosidad

Como uno de los objetivos del presente capítulo es analizar las posibles ventajas de la utilización de las técnicas remotas (SfM) para el estudio de la rugosidad en muestras de laboratorio frente al uso de los métodos manuales, se ha decidido obtener varios “perfiles de validación” empleando técnicas tradicionales. Para ello, se ha empleado un “Peine de Barton” (con una separación entre cerdas de 1 mm) para la obtención de 32 perfiles (16 por muestra): 10 transversales (Figura 47) y 6 longitudinales (Figura 48). (Notar que, para facilitar el posicionamiento de estos perfiles, nos hemos servido de las pequeñas marcas de color rojo incluidas en la plantilla.)

Una vez adquiridos los perfiles de validación (estableciendo contacto directo con la muestra) estos fueron fotografiados “in situ” (colocando el Peine de Barton sobre un papel milimetrado) e importados directamente a AutoCAD, donde fueron escalados y digitalizados “a mano” (estableciendo 1 mm de frecuencia, equivalente al tamaño mínimo entre cerdas) para obtener la geometría real de la superficie. Posteriormente, estos perfiles manuales serán empleados para analizar la precisión de los perfiles digitales obtenidos de los modelos 3D (ver Sección 4.4.1) y comparar los valores JRC obtenidos con ambas metodologías (ver Sección 4.4.2).

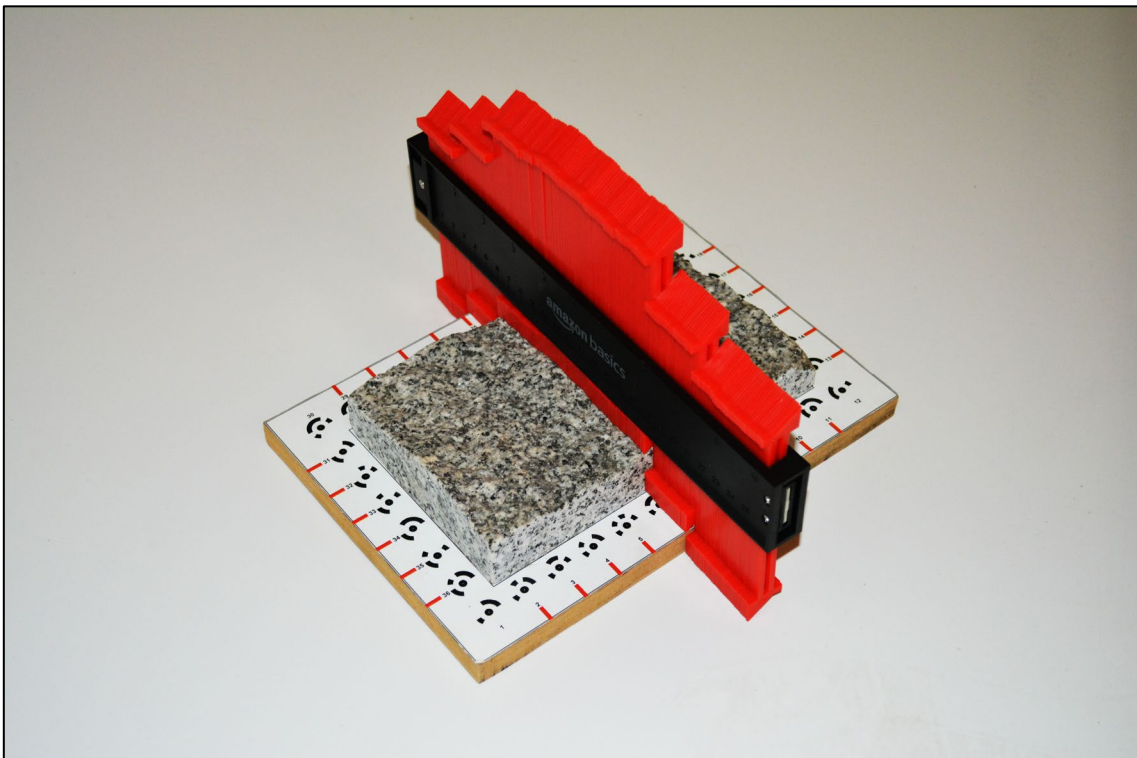


Figura 47. Imagen de la obtención de los perfiles manuales (transversales) adquiridos con el Peine de Barton en la Muestra 2.



Figura 48. Imagen de la obtención de los perfiles manuales (longitudinales) adquiridos con el Peine de Barton en la Muestra 2.

### 4.3.5. Generación de los modelos 3D

En esta ocasión, se ha decidido trabajar con nubes de puntos de alta densidad generadas en dos calidades de procesamiento diferentes proporcionadas por Agisoft Metashape: alta en el primer modelo (Muestra 1) y media en el segundo (Muestra 2). La calidad media ha sido seleccionada en la Muestra 2 para poder comprobar si la reducción del tiempo de procesado ( $< 1/3$ ) puede afectar de manera significativa a la calidad y la precisión de los resultados finales (Sección 4.4.1). No obstante, en el primero de los pasos (DPC) se ha decidido trabajar directamente con una calidad alta para ambos modelos, con el objetivo de obtener unas nubes de puntos iniciales “sólidas” que nos ayuden a generar unas HDPC de alta calidad. (Notar que, a diferencia de los modelos realizados en el Capítulo 3, el número de imágenes empleadas en este estudio es significativamente inferior (110 frente a  $> 150$ ), por lo tanto, es posible aumentar la calidad de procesamiento inicial sin perjudicar en exceso los tiempos de procesado de la segunda nube (HDPC).) La Tabla 10 muestra los tiempos de cálculo requeridos para la generación de ambas nubes (DPC y HDPC) en las dos muestras ensayadas. (Todos los cálculos se realizaron utilizando un solo núcleo de una computadora Intel Core i7 – 6700 (procesador de 3,4 GHz y 16 GB de RAM) ejecutando el sistema operativo Windows.)

Tabla 10. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en laboratorio.

Modelo	DPC		HDPC	
	Precisión	Tiempo	Precisión	Tiempo
Muestra 1	Alta	32 min	Alta	1 d 12 h 40 min
Muestra 2	Alta	42 min	Media	11 h 58 min

Del mismo modo, una vez finalizada la generación de las nubes de puntos de alta densidad de ambos modelos, estas fueron escaladas y orientadas dentro del propio programa con la ayuda de las coordenadas relativas de los 38 puntos de control (GCPs) incluidos en la Plantilla de Orientación 3.0 descrita en la Sección 4.3.2 del presente capítulo. La Tabla 11 muestra los errores medios de las coordenadas (x, y, z) de estos puntos (diferencias entre sus coordenadas reales (conocidas) y las proporcionadas por el modelo 3D generado en Agisoft Metashape).

Tabla 11. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 36 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en laboratorio.

Coordenada	Muestra 1	Muestra 2
X	0,080	0,062
Y	0,092	0,064
Z	0,023	0,057

### 4.3.6. Extracción de los perfiles

Una vez generados y orientados los modelos 3D (Muestra 1 y Muestra 2) con la ayuda de Agisoft Metashape, estos han sido exportados a MATLAB (The MathWorks Inc 2019) con el objetivo de: (i) extraer los perfiles de rugosidad y (ii) realizar el análisis frecuencial. En total, se obtuvieron 58 perfiles digitales en cada una de las nube de puntos de alta densidad generadas: 37 perfiles transversales y 21 perfiles longitudinales, que fueron extraídos con una distancia “entre sí” de 0,5 cm (Figura 49). De los cuales, 16 perfiles (10 transversales y 6 longitudinales) fueron seleccionados como “perfiles de validación” para (i) analizar la precisión de los modelos 3D generados y (ii) estudiar la “calidad” del proceso de caracterización de la rugosidad, el cual se realizó empleando los 42 perfiles restantes (denominados “perfiles básicos”). (Notar que, estos “perfiles de validación” obtenidos a partir de los modelos 3D han sido extraídos empleando las mismas ubicaciones utilizadas para la extracción de los “perfiles manuales” obtenidos a partir de métodos tradicionales, descritos en la Sección 4.3.4 del presente capítulo.)

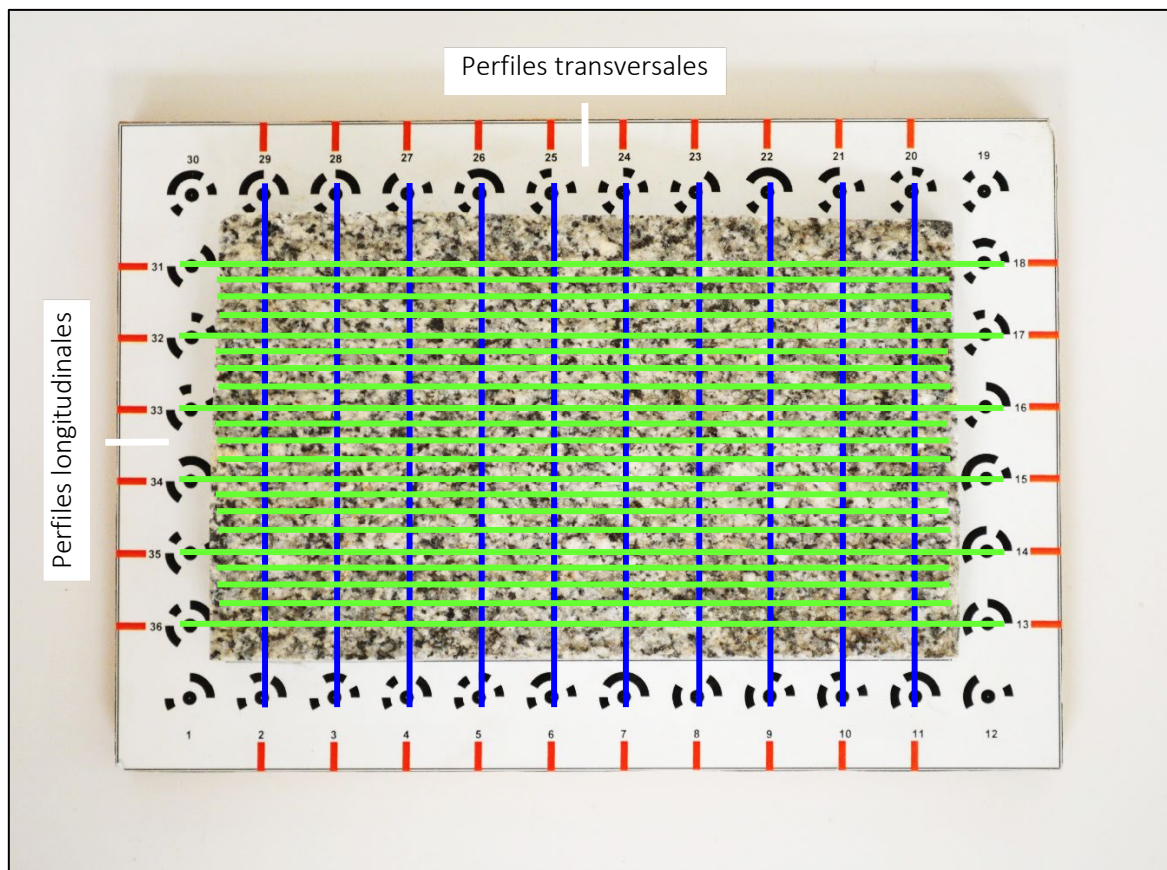


Figura 49. Imagen cenital de la Muestra 2 donde se muestra la ubicación de los 58 perfiles de rugosidad obtenidos con la ayuda de MATLAB.

## 4.4. Resultados y discusión

### 4.4.1. Análisis de la precisión de los perfiles

Con el objetivo de analizar la precisión de los modelos 3D generados, se realizó, en primer lugar, una comparación visual (cualitativa) entre los 32 “perfiles de validación” digitales obtenidos de las nubes de puntos generadas con la técnica SfM (Sección 4.3.6) y los 32 “perfiles de validación” equivalentes, obtenidos a partir de métodos manuales empleando el “Peine de Barton” (Sección 4.3.4).

Esta comparación, se realizó con la ayuda del software MATLAB, el mismo empleado para la extracción de los perfiles digitales en ambos modelos. La Figura 50 y la Figura 51, muestran, a modo de ejemplo, dos comparaciones efectuadas en dos perfiles transversales ( $Prof_{29}^{Muestra_1}$  y  $Prof_{54}^{Muestra_2}$ ) obtenidos de los Modelos 3D/Muestras 1 y 2, respectivamente. (Notar que, para facilitar la visualización, se ha seleccionado únicamente la sección central de ambos perfiles ( $L = 100\text{ mm}$ ) donde se muestra la superficie de roca 100 % intacta, sin incluir el borde de la “pastilla” y el plano horizontal donde se sitúa la Plantilla.)

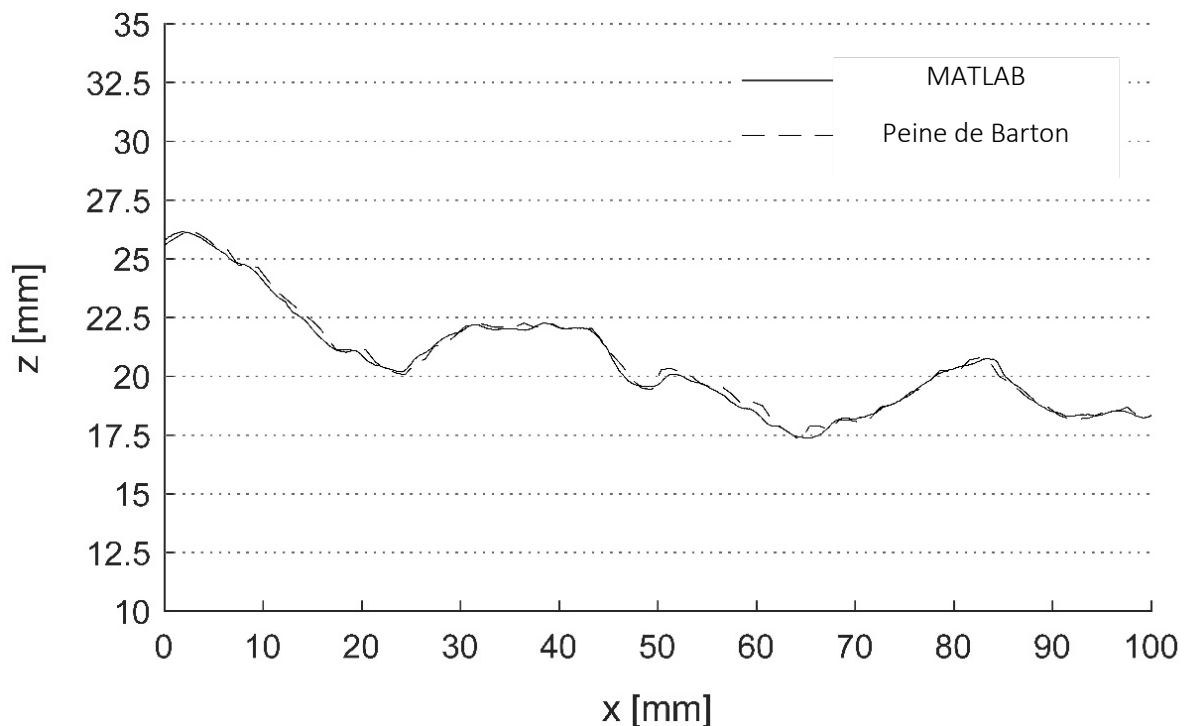


Figura 50. Ejemplo de comparación visual entre perfiles: “perfiles de validación”  $Prof_{29}^{Muestra_1}$  obtenidos a partir de métodos manuales (línea discontinua) y a partir de métodos digitales (línea continua).

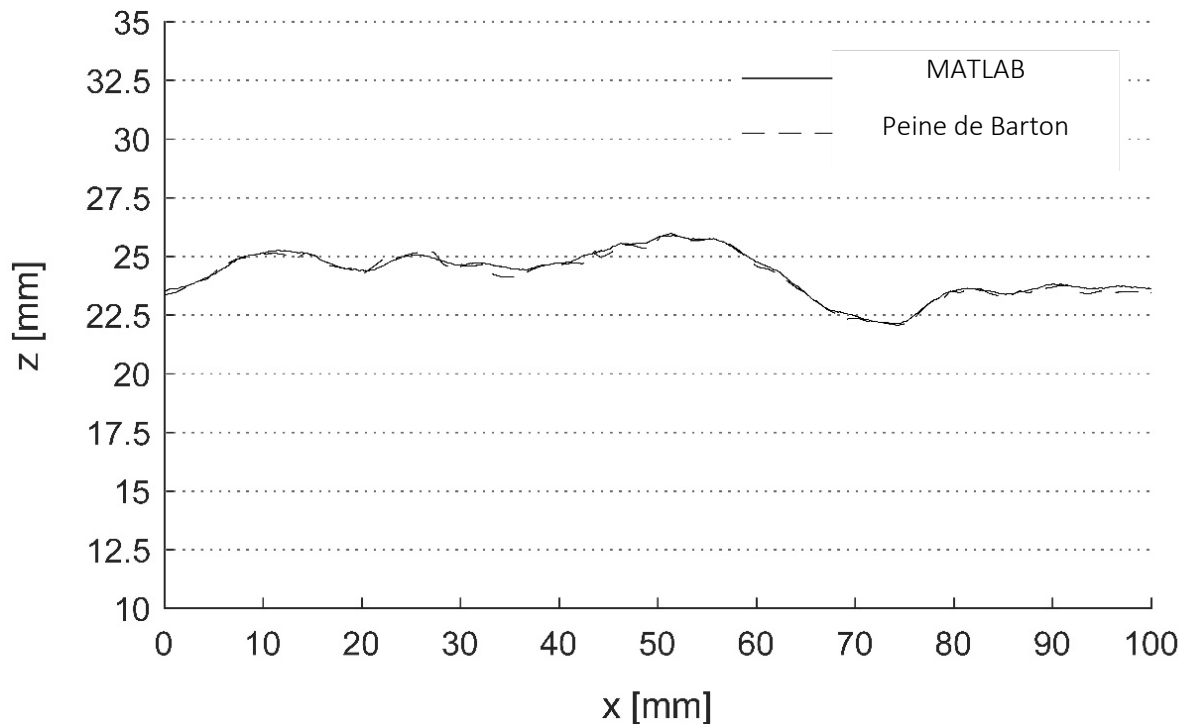


Figura 51. Ejemplo de comparación visual entre perfiles: “perfiles de validación”  $Prof_{54}^{Muestra2}$ , obtenidos a partir de métodos manuales (línea discontinua) y a partir de métodos digitales (línea continua).

Una vez realizada la comparación visual, es posible observar que ambos perfiles (MATLAB y “Peine de Barton”) son prácticamente iguales. No obstante, con el objetivo de analizar en profundidad el grado de similitud entre ambos métodos, se realizó un segundo análisis (cuantitativo) calculando la rugosidad media ( $R_a$ ) de los “perfiles diferencia” (obtenidos a partir de la “resta” entre los perfiles adquiridos con el “Peine de Barton” y los perfiles digitales extraídos de las nubes de puntos de alta densidad) para cada una de las localizaciones de los 32 “perfiles de validación”.

Para ello, se empleó la formulación de  $R_a$ :

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^N |z_i| \cdot \Delta l$$

- Donde:
- $L$  es la longitud total del perfil
  - $N$  es el número de puntos muestreados
  - $z_i$  es la amplitud del perfil en cada punto
  - $\Delta l$  es la distancia horizontal entre 2 puntos muestreados

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

A partir de esta formulación, es posible determinar “cuantitativamente” las diferencias entre ambos perfiles, ya que, si ambos perfiles fueran idénticos, los valores  $R_a$  de los “perfiles diferencia” tendrían que ser teóricamente cero. En esta ocasión, todos los perfiles analizados han mostrado unos valores máximos de  $R_a$  inferiores a 0,5 mm, con un valor medio para los 32 “perfiles de validación (considerando ambas muestras) de  $\bar{R}_a = 0,26$  mm. Estos resultados confirman las observaciones “cualitativas” realizadas visualmente en las Figura 50 y 51, demostrando que las diferencias entre ambos métodos son prácticamente nulas.

Asimismo, estos resultados fueron analizados de manera independiente (Muestra 1 y Muestra 2) con el objetivo de determinar la posible influencia del “nivel de computación” en la calidad y precisión de los modelos 3D generados. (Notar que, aunque las nubes iniciales de ambos modelos se realizaron en alta calidad, se seleccionaron diferentes niveles de computación para la generación de las HDPC: alta en el Modelo 1 y media en Modelo 2; ver Tabla 10 en Sección 4.3.5 para más información.) En este sentido, ambos modelos mostraron valores de  $\bar{R}_a$  idénticos: 0,26 mm para los 16 “perfiles de validación” extraídos de la Muestra 1 y 0,26 mm para los obtenidos de la Muestra 2; con desviaciones típicas de 0,099 mm y 0,107 mm, respectivamente. Por lo tanto, es posible determinar “a priori” que la selección de una calidad de procesamiento “elevada” (en lugar de media) podría no ser estrictamente necesaria para la realización de este tipo de análisis; puesto que, el aumento en los tiempos de procesado (x 3) no se ve compensado con un aumento directo en la calidad de los resultados en términos de  $\bar{R}_a$ .

#### 4.4.2. Estimación del JRC

Con el objetivo de darle un enfoque práctico a la metodología propuesta en este capítulo, se ha decidido utilizar el índice JRC (Joint Roughness Coefficient) para poder evaluar las posibilidades de análisis de los perfiles de rugosidad a partir de la parametrización y ajuste de su información frecuencial. Para ello, en primer lugar, fue necesario obtener una base de datos sólida (de perfiles caracterizados) que será empleada posteriormente para ajustar el clasificador; asignando un valor JRC a todos los perfiles extraídos en las nubes de puntos generadas en las muestras 1 y 2.

No obstante, como la determinación del índice JRC “en campo” se realiza a partir de un único parámetro, el cual puede ser muy subjetivo, como se demostrará a continuación, se ha decidido emplear información estadística para su obtención; a partir de correlaciones con otros parámetros (objetivos) presentes en la literatura. Por ejemplo, Li y Zhang (2015) realizaron un extenso análisis de las diversas ecuaciones publicadas que ligan alguno de esos parámetros con el coeficiente JRC (en total, 47 ecuaciones). Para ello emplean 112 perfiles obtenidos de la literatura, proponiendo, finalmente, unas nuevas formulaciones para la relación de cada parámetro estadístico con el JRC. En sus conclusiones Li y Zhang (2015) indican que las mejores correlaciones con el JRC se consiguen con los parámetros estadísticos  $Z_2$  (valor cuadrático medio de la pendiente) y  $\sigma_i$  (desviación estándar del ángulo medio).

En este capítulo se utilizó la siguiente correlación entre el parámetro estadístico  $Z_2$  y el índice JRC propuesta por estos autores:

$$JRC = 55,7376 \cdot Z_2 - 4,1166$$

Para el cálculo del  $Z_2$  se empleó la formulación:

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)}{x_{i+1} - x_i} \right]^{1/2}$$

Donde:

- $L$  es la longitud total del perfil
- $N$  es el número de puntos muestreados
- $x_i, y_i$  son las coordenadas del punto muestreado en el perfil

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la formulación propuesta por Li y Zhang (2015) solo es apta para perfiles con una longitud determinada  $L \in [72 - 119,6 \text{ mm}]$  y para un rango de rugosidades concreto  $Z_2 \in [0,074 - 0,433]$ . Además, como los resultados estadísticos del  $Z_2$  dependen directamente de la frecuencia de muestreo (es decir, la distancia entre cada par de puntos tomados del perfil) los autores validan su formulación para una distancia entre puntos de 0,4 mm.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

De este modo, para ajustarnos a las indicaciones de Li y Zhang (2015), todos los perfiles obtenidos de los modelos 3D de ambas muestras (116 en total; 58 por modelo) han sido extraídos empleando una frecuencia de muestreo de  $2,5 \text{ mm}^{-1}$  y una  $L = 100 \text{ mm}$  para la estimación del índice JRC.

La Figura 52 muestra los resultados obtenidos incluyendo los 74 perfiles transversales y los 42 perfiles longitudinales (“perfiles básicos” + “perfiles de validación”) extraídos de los Modelos 1 y 2.

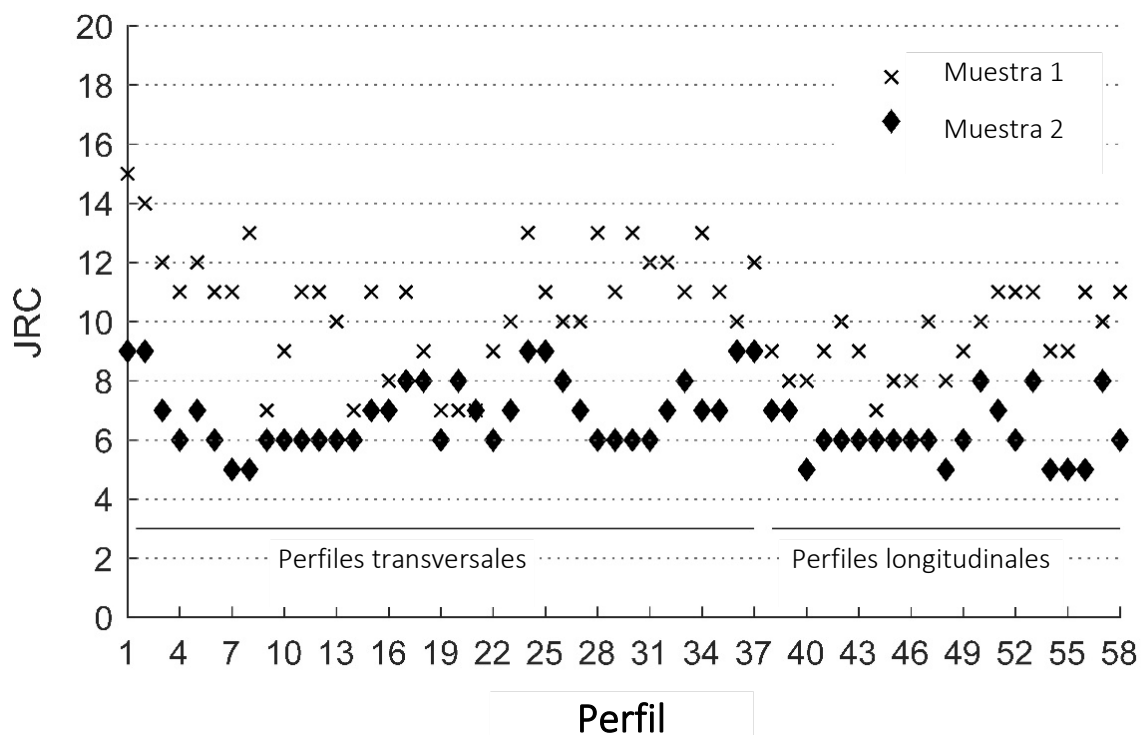


Figura 52. Valores JRC estimados a partir de correlaciones con el parámetro estadístico  $Z_2$  para todos los perfiles obtenidos de los modelos 3D: 58 (Muestra 1; cruces) + 58 (Muestra 2; rombos).

A la vista de los resultados, es posible observar que la Muestra 1 (con índices JRC entre 7 y 15 en la dirección transversal; y entre 7 y 11 en la dirección longitudinal) presenta una superficie más rugosa, en términos de JRC, que la Muestra 2 (con índices JRC entre 5 y 9 en la dirección transversal; y entre 5 y 8 en la dirección longitudinal).

Estos valores, pueden ser verificados de manera visual observando (de nuevo) los “perfiles de validación” transversales proyectados en la sección anterior (Sección 4.4.1): Figura 50 (Muestra 1) y Figura 51 (Muestra 2); donde, el primero de los perfiles ( $Prof_{29}^{Muestra_1}$ ) obtuvo una valoración JRC de 11 puntos y el segundo ( $Prof_{54}^{Muestra_2}$ ) una valoración de 5 puntos.

Asimismo, con el objetivo de comparar los valores JRC obtenidos con ambas metodologías (métodos estadísticos y métodos manuales), los 16 “perfiles de validación” adquiridos con la ayuda del “Peine de Barton” en la Muestra 1, fueron analizados “por el método tradicional” estimando su valor JRC de forma visual. Para ello, se realizó una encuesta entre 14 personas –todas ellas con formación geológica o geotécnica, y con diferentes niveles de experiencia y formación–, a las que se les pidió que asignaran valores de JRC a cada perfil, utilizando el enfoque convencional a partir de comparación visual frente a los 10 perfiles de referencia “tipo” establecidos por Barton y Choubey (1977).

Estos resultados se muestran en la Figura 53, donde es posible observar que los valores JRC estimados visualmente tienden a ser significativamente más altos que los obtenidos a partir del enfoque propuesto en esta sección (con índices JRC entre 7 y 19; 4 puntos por encima de los resultados máximos obtenidos a partir del análisis estadístico de parámetro  $Z_2$ ).

Además, gracias a este estudio, se ha podido demostrar que el enfoque visual tradicional es mucho más subjetivo, mostrando diferencias entre los distintos observadores de hasta 12 puntos.

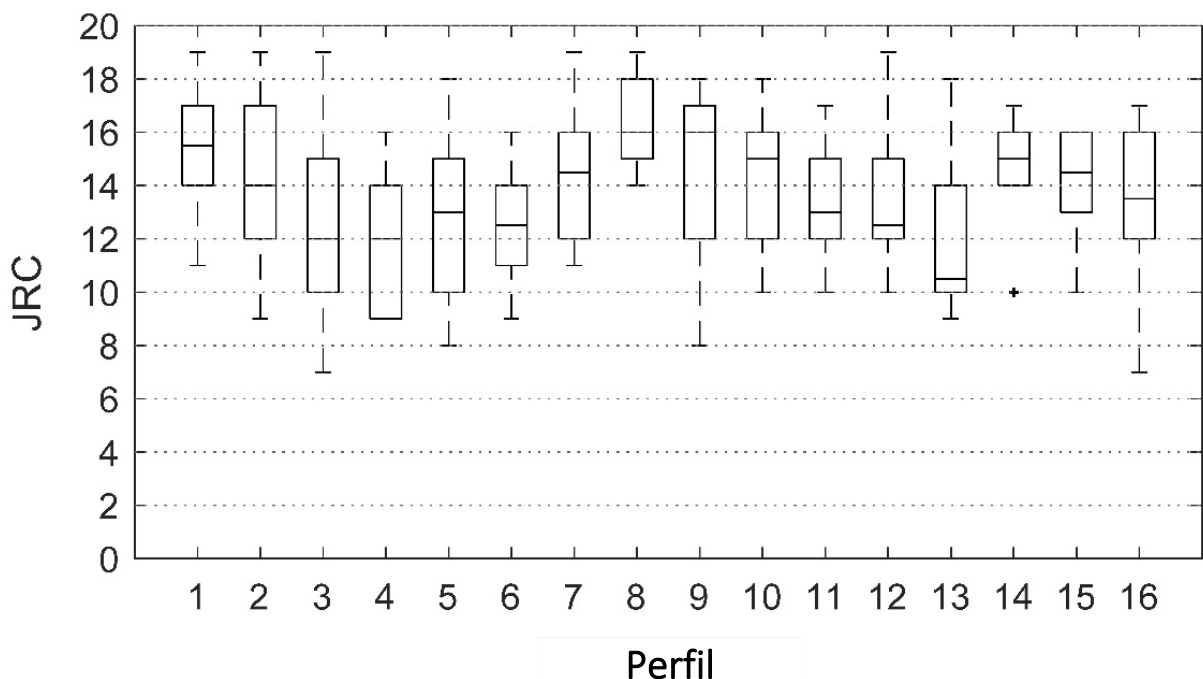


Figura 53. Resumen de los valores JRC (estimados visualmente por 14 personas diferentes) para los 16 “perfiles de validación” obtenidos en la Muestra 1.

#### 4.4.3. Obtención del espectro de frecuencia de los perfiles

Una de las principales ventajas de analizar la rugosidad considerando el perfil como una señal espacial, es que podemos emplear en él diferentes técnicas de procesamiento de señales, como, por ejemplo, la representación espectral o los filtros. En este sentido, es posible obtener su espectro de frecuencias mediante la siguiente fórmula propuesta por Prandoni y Vetterli (2008):

$$Z[k] = \sum_{n=0}^{N-1} z[n] \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}nk}$$

con  $k = 0, 1, \dots, N - 1$

Donde:  $z$  es la amplitud del perfil en los puntos muestreados  
 $N$  es el número de puntos muestreados  
 $Z$  es la amplitud espectral

Notar que,  $e^{j\frac{2\pi}{N}nk}$  representan elementos  $w_n^{(k)}$  que forman una base ortogonal en  $\mathbb{C}^N$ , tal que:

$$w_n^{(k)} = e^{j\frac{2\pi}{N}nk}$$

A modo de ejemplo, la Figura 54 muestra uno de los “perfiles básicos” obtenidos de la Muestra 1 y la Figura 55 muestra su correspondiente espectro de frecuencias, con las frecuencias bajas (a la izquierda) representando la ondulación y las frecuencias altas (a la derecha) representando las irregularidades.

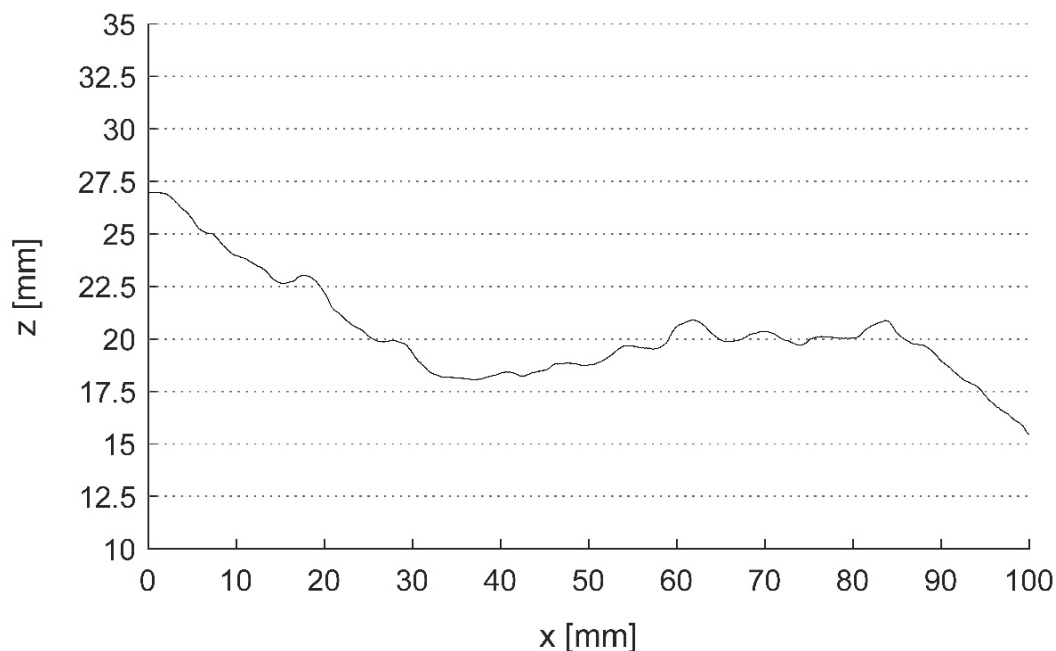


Figura 54. Ejemplo de uno de los “Perfiles básicos” ( $Prof_{32}^{Muestra_1}$ ) obtenido de la Muestra 1.

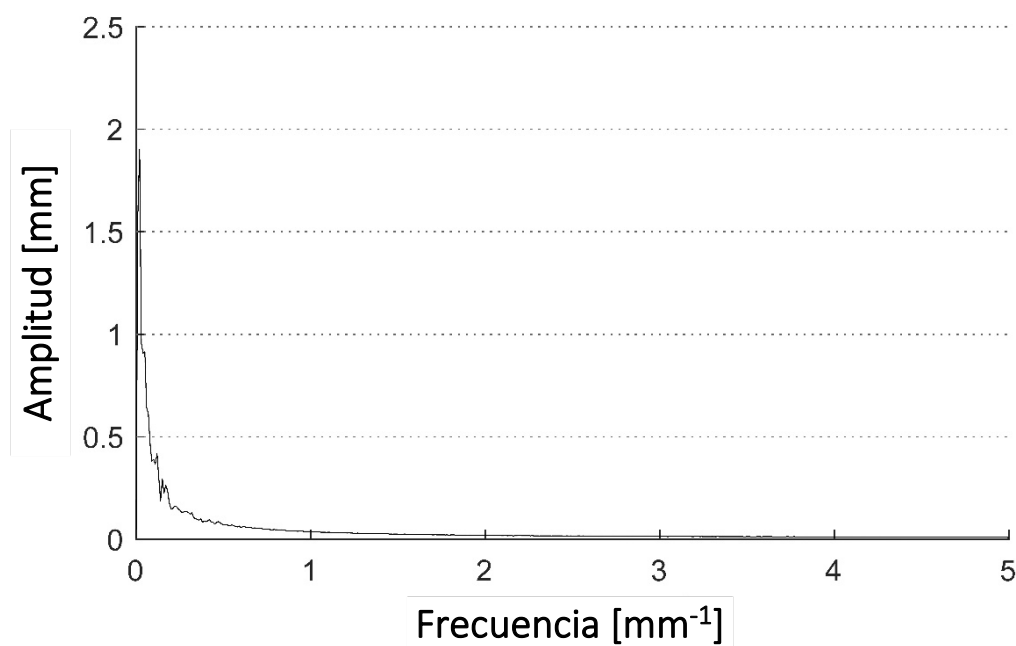


Figura 55. Espectro de frecuencias correspondiente al perfil ( $Prof_{32}^{Muestra_1}$ ) mostrado en la Figura 54.

Notar que, sólo se han considerado las frecuencias positivas, y que la junta, como cualquier otra señal continua, debe de muestrearse antes de realizar el análisis, de modo que la frecuencia máxima observada será la mitad de la frecuencia de muestreo (Prandoni y Vetterli, 2008). En este estudio, se han seguido las recomendaciones proporcionadas por Shirono y Kulatilake (1997) para el muestreo de los perfiles de rugosidad digitales obtenidos a partir de los modelos 3D generados en Agisoft Metashape, estableciendo una frecuencia de  $10 \text{ mm}^{-1}$  para la realización del análisis espectral. De este modo, la frecuencia máxima observada en los perfiles será de  $5 \text{ mm}^{-1}$ , es decir, la mitad de la frecuencia de muestreo empleada.

De manera adicional, se muestran los dos espectros de frecuencia obtenidos a partir de la formulación propuesta por Prandoni y Vetterli (2008) para los dos “Perfiles de validación” presentados en la Sección 4.4.1 (Figura 56). A partir de su observación, es posible apreciar que el primero de los espectros (Figura 56a), que corresponde al perfil ( $Prof_{29}^{Muestra_1}$ ) obtenido de la Muestra 1 (más rugosa) mantiene contenido frecuencial (es decir, amplitudes superiores a cero) para frecuencias superiores a  $2 \text{ mm}^{-1}$ . Sin embargo, el segundo perfil (Figura 56b), que corresponde al perfil ( $Prof_{54}^{Muestra_2}$ ) obtenido de la Muestra 2 (menos rugosa) decae rápidamente a amplitudes muy bajas a partir de frecuencias superiores a  $0,2 \text{ mm}^{-1}$ , con un contenido frecuencial prácticamente nulo para frecuencias superiores a  $0,4 \text{ mm}^{-1}$ .

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

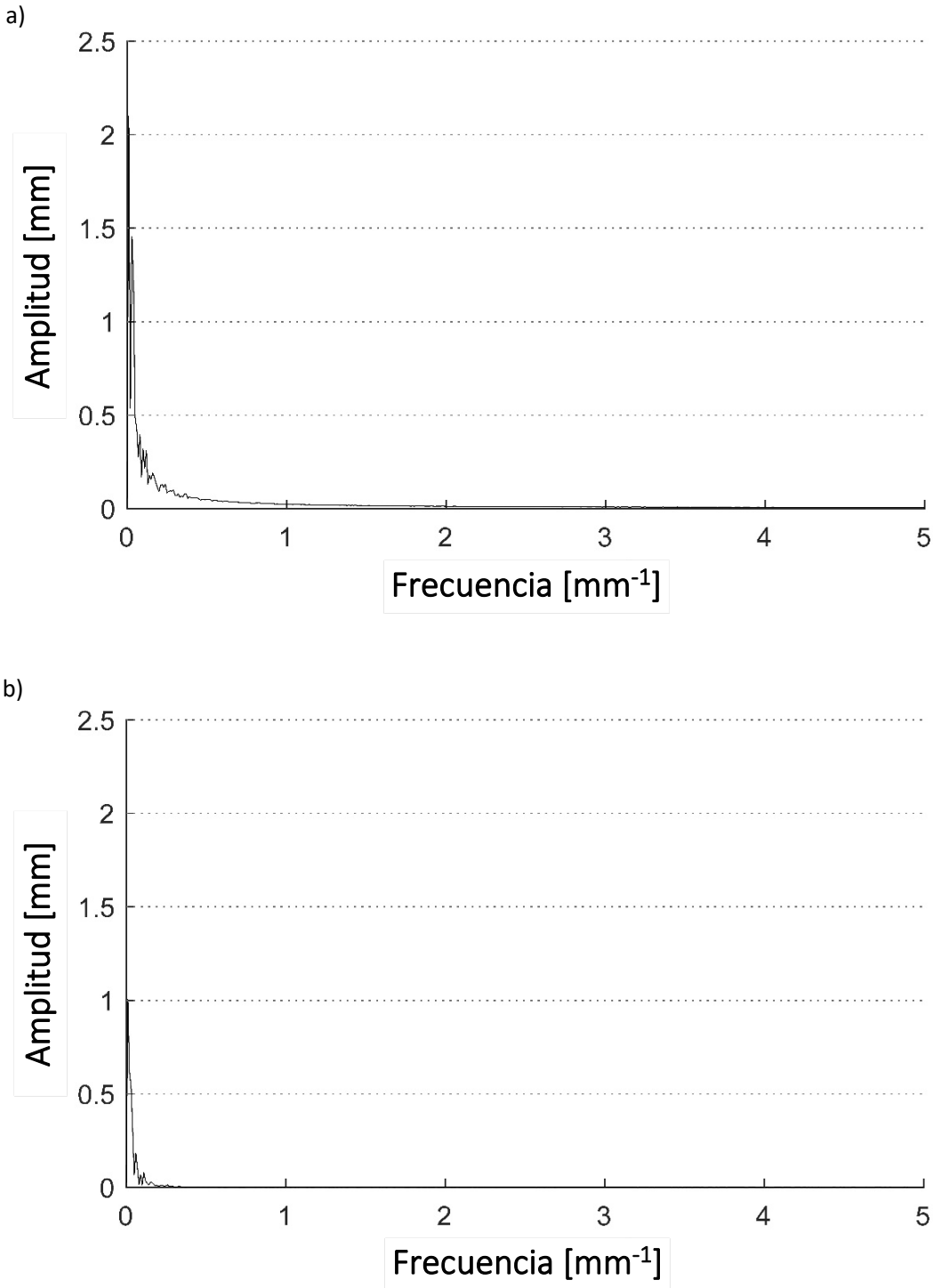


Figura 56. Espectros de frecuencia: a) Muestra 1 (Figura 50); b) Muestra 2 (Figura 51).

#### 4.4.4. Parametrización del espectro de frecuencia

Para parametrizar los espectros de frecuencia, debemos buscar el tipo de función matemática que mejor represente las relaciones amplitud-frecuencia obtenidas del análisis espectral. Para ello, y dada su influencia en el comportamiento a cortante de las juntas, parece adecuado establecer un valor umbral (es decir, una frecuencia) que separe entre macro-rugosidad (ondulación) y micro-rugosidad (irregularidad o rugosidad de segundo orden); esto nos permitirá ajustar una función específica a cada parte del espectro. Estas funciones, pueden ser independientes (es decir, no tener continuidad en el umbral), o pueden estar restringidas para que se cumpla la continuidad en el umbral.

Aunque dicho umbral dependerá del problema que se analice (por lo que requerirá un análisis más profundo y caso por caso), podemos emplear como orientación valores de referencia propuestos en la bibliografía. Por ejemplo, Palmström (2001) propone un umbral entre ondulación y micro-rugosidad de alrededor de 0,05 – 0,50 m para perfiles con longitudes de hasta 10 m, o de alrededor de 1/200-1/20 de la longitud del perfil. De este modo, para un perfil concreto, se define el umbral como la longitud del perfil dividida por un valor comprendido entre 20 y 200 (en este trabajo empleamos 50) transformándolo en frecuencia a través de su inversa. (Notar que, siguiendo las recomendaciones de Palmström (2001), se ha establecido un umbral de frecuencia de  $0,5 \text{ mm}^{-1}$  para los perfiles extraídos de los modelos 3D generados en Agisoft Metashape, equivalente a una distancia de muestreo de 2 mm, que representa 1/50 de la longitud de los perfiles ( $L = 100 \text{ mm}$ ).)

Basándonos en dicha descripción, y considerando que el mejor enfoque para ajustar el espectro no se conoce de antemano, en este capítulo proponemos cinco enfoques diferentes para parametrizar las relaciones amplitud-frecuencia de los espectros de generados en la sección anterior:

1. **Enfoque E:** Ajuste con una única función exponencial negativa  $Z = K \cdot e^{-\lambda f}$  que cubre todo el espectro; donde  $f$  es la frecuencia y  $Z$  es la amplitud espectral, y donde  $K$  y  $\lambda$  son los parámetros de ajuste.
2. **Enfoque EEi:** Ajuste con dos funciones exponenciales negativas independientes, una para frecuencias altas  $Z = K_h \cdot e^{-\lambda_h f}$  y otra para frecuencias bajas  $Z = K_l \cdot e^{-\lambda_l f}$ ; donde  $(K_l, \lambda_l)$  y  $(K_h, \lambda_h)$  son los parámetros de ajuste para frecuencias bajas y altas, respectivamente.
3. **Enfoque EEc:** Ajuste con dos funciones exponenciales negativas para frecuencias altas y bajas ( $Z = K_h \cdot e^{-\lambda_h f}$  y  $Z = K_l \cdot e^{-\lambda_l f}$ ) que se limitan a ser continuas en el umbral entre frecuencias altas y bajas.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

4. **Enfoque ESi:** Ajuste con una función exponencial negativa para frecuencias bajas ( $Z = K_l \cdot e^{-\lambda_l f}$ ) y una línea recta independiente para frecuencias altas ( $Z = p_1 + p_2 \cdot f$ ); donde  $p_1$  y  $p_2$  son los parámetros de ajuste.
5. **Enfoque ESc:** Ajuste con una función exponencial negativa para frecuencias bajas  $Z = K_l \cdot e^{-\lambda_l f}$  y una línea recta para frecuencias altas  $Z = p_1 + p_2 \cdot f$ . Ambas funciones deben ser continuas en el umbral entre las frecuencias altas y bajas.

El enfoque **E** es el más sencillo porque, aunque emplea una función exponencial negativa con sólo dos parámetros de ajuste que generalmente concuerdan bien con la forma de las relaciones amplitud-frecuencia, no diferencia entre frecuencias bajas y altas (es decir, entre ondulación y rugosidad de segundo orden). Los enfoques **EEi** y **EEc** sí distinguen entre frecuencias altas y bajas: **EEi** requiere el ajuste de cuatro parámetros ( $K_l, \lambda_l, K_h, \lambda_h$ ), mientras que en el enfoque **EEc** uno de los parámetros depende de los demás (debido a la condición de continuidad impuesta) por lo que sólo es necesario ajustar tres parámetros. Los enfoques **ESi** y **ESc** son similares, con la única diferencia de que estos simplifican la función de ajuste para frecuencias altas, utilizando una línea recta en lugar de una exponencial negativa.

#### 4.4.5. Análisis de clasificación

Una vez establecido el umbral entre la rugosidad primaria (ondulación) y secundaria (irregularidades), es posible obtener (utilizando un enfoque de mínimos cuadrados) los 8 parámetros de ajuste:  $K$ ,  $\lambda$ ,  $K_l$ ,  $\lambda_l$ ,  $K_h$ ,  $\lambda_h$ ,  $p_1$  y  $p_2$ , de los 5 enfoques propuestos en la sección anterior (**E**, **EEi**, **EEc**, **ESi** y **ESc**). De este modo, será posible evaluar el rendimiento de dichos enfoques a la hora de representar los espectros de frecuencia de los perfiles de rugosidad generados en Agisoft Metashape, en términos de JRC. Para ello, se han empleado los valores JRC estimados en la Sección 4.4.2 a partir de correlaciones con el parámetro estadístico  $Z_2$ , puesto que, en comparación con los resultados obtenidos a partir del método tradicional (estimación visual), estos proporcionan unos resultados más robustos (ver Sección 4.4.2 para más información). Por lo tanto, el objetivo de esta sección es analizar si los valores JRC de los perfiles extraídos de los modelos 3D pueden estimarse a partir de los parámetros de ajuste obtenidos del análisis espectral o no.

De este modo, el objetivo principal de este capítulo es resolver un problema de clasificación, en el que los parámetros de ajuste son los atributos, y los valores JRC representan las categorías o clases que deben clasificarse. Para ello, se ha empleado el algoritmo de vecinos cercanos 1-NN implementado en el software de código abierto WEKA, un programa de minería de datos y aprendizaje automático desarrollado por la Universidad de Waikato, Nueva Zelanda (Hall et al. 2009). Este algoritmo (1-NN) se basa en el supuesto de que todos los elementos que pertenecen a la misma clase estarán próximos entre sí, por lo tanto, la clasificación de un nuevo objeto se realiza en función de la clase de su vecino más próximo. Una vez “entrenado” el algoritmo, este nos proporcionará un clasificador, que nos ayudará a estimar (o predecir) los valores JRC de los perfiles de rugosidad (categorías) a partir de los parámetros de ajuste obtenidos del análisis espectral (atributos).

Para alimentar el modelo (y generar el clasificador correspondiente) se han empleado los 84 “perfiles básicos” extraídos de ambas muestras con la ayuda de MATLAB (42 perfiles por muestra); mientras que los 32 perfiles restantes (16 “perfiles de validación” por muestra) han sido utilizados para validar el proceso (ver Sección 4.3.6 para más información sobre el proceso de extracción de los perfiles de rugosidad en los Modelos 1 y 2).

Notar que, al emplear toda información procedente de ambas muestras a la vez, es posible generar un clasificador con una aplicabilidad “real” más amplia, ya que los perfiles empleados para su generación poseen un rango de rugosidad más elevado (valores JRC comprendidos entre 5 y 15); superior al que se alcanzaría tratando los datos de manera aislada: Muestra 1 (JRC: 7 – 15), Muestra 2 (JRC: 5 – 9).

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance

La Figura 57 muestra, a modo de ejemplo, la matriz de confusión correspondiente al análisis del **Enfoque EEc**. En ella, es posible observar que, aunque el porcentaje de estimaciones correctas es relativamente bajo (alrededor del 25%), la matriz es claramente diagonal, de modo que el porcentaje de estimaciones acertadas aumenta hasta el 63% si aceptamos como “válida” una clase inmediatamente superior ( $JRC + 1$ ) o inferior ( $JRC - 1$ ) de la respuesta correcta (es decir, para un perfil con  $JRC = 5$  aceptamos la estimación si el perfil se clasifica como  $JRC = 4, 5$  o  $6$ ); y hasta el 81% si aceptamos como válidas dos clases por encima o por debajo del valor de partida.

		JRC [Estimado]																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
JRC [Válido]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 57. Matriz de confusión para el Ajuste EEc.

Tabla 12. Resultados de los análisis de clasificación para los diferentes ajustes propuestos.

Ajuste	% de acierto		
	$JRC$	$JRC \pm 1$	$JRC \pm 2$
<i>E</i>	12.5	53.1	81.3
<i>EEi</i>	21.9	56.3	71.9
<i>EEc</i>	25.0	62.5	81.3
<i>ESi</i>	15.6	46.9	78.1
<i>ESc</i>	12.5	53.1	81.3

A modo de resumen, la Tabla 12 muestra los resultados de este análisis para todos los enfoques planteados en la sección 4.4.5 del presente capítulo (**E**, **EEi**, **EEc**, **ESi** y **ESc**). Estos resultados sugieren que la parametrización proporcionada por el **Enfoque EEc** – considerando dos funciones exponenciales negativas (una para frecuencias bajas y otra para frecuencias altas) imponiendo su continuidad en el umbral entre frecuencias bajas y altas– tiene el mejor rendimiento predictivo. Sin embargo, es posible observar que los resultados son muy similares entre los diferentes enfoques propuestos, por lo tanto, es necesario seguir investigando para identificar el enfoque más “efectivo”; capaz de predecir la rugosidad en un amplio espectro de casos (es decir, diferentes tipos de roca o junta, con diferentes perfiles de rugosidad debido a su origen, etc.).

## **5. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia**

### **5.1. Introducción**

Una vez desarrollada la metodología necesaria para realizar la correcta extracción y clasificación de los perfiles digitales obtenidos a partir de modelos 3D generados mediante la técnica SfM (en laboratorio), el siguiente objetivo de la presente tesis doctoral es trasladar dicha metodología a una escala real de aplicación (en campo) para el análisis de la rugosidad de las discontinuidades en taludes rocosos. De este modo, se realizarán las modificaciones necesarias para adaptar el uso de la técnica SfM a larga distancia, evitando de este modo, establecer contacto directo con el talud a la hora efectuar el estudio y análisis de este parámetro.

Notar que, la utilización de métodos manuales, como los “contour gauges” o los perfilómetros, fuera del ambiente del laboratorio (en campo) nos obliga a establecer contacto directo con el macizo rocoso mientras se toman las mediciones, lo que aumenta el tiempo de adquisición de datos, y eleva el riesgo para la seguridad de los trabajadores. Además, la toma de estos datos puede estar limitada por las propias características del acceso a la zona de trabajo, que en ocasiones puede ser imposible.

En este sentido, el uso de técnicas remotas de caracterización 3D, como el láser escáner (LiDAR) o las técnicas fotogramétricas, están teniendo un inmenso desarrollo en los últimos años como alternativa a los métodos tradicionales para medir con precisión las irregularidades de las superficies de las rocas y analizar su rugosidad en campo. Sin embargo, en comparación con los métodos láser terrestres (TLS), las limitaciones económicas y de manejo que presenta la fotogrametría digital terrestre (TDP) son mucho más escasas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de aplicación de esta última técnica, relacionados con su uso a larga distancia en la caracterización de macizos rocosos, junto a las modificaciones necesarias para poder adaptar esta técnica a esta nueva escala de trabajo.

En primer lugar, es necesario resaltar que, en la TDP, la calidad y precisión de los resultados está directamente relacionada con la propia calidad de las imágenes empleadas para la generación de los modelos 3D (Haneberg 2007). A su vez, la resolución de estas imágenes está controlada por la calidad de las lentes y la propia resolución del sensor. Por lo tanto, en fotogrametría digital, la resolución final del modelo 3D, se ve afectada, además de por el tamaño del píxel de la cámara, por la longitud focal de la lente y la distancia del sensor/dispositivo respecto al objeto de estudio (Sturzenegger 2010).

En este sentido, la variación de la distancia focal nos permite capturar el mismo objeto a diferentes escalas y resoluciones. Por lo tanto, aumentando la distancia focal (por ejemplo, mediante el uso de teleobjetivos), podremos alejarnos del elemento que se quiere caracterizar conservando la misma escala y resolución de imagen (Haneberg 2007; Wolter et al. 2014).

Para trabajos de caracterización en taludes rocosos de corto alcance (< 300 m) se recomienda la utilización de lentes con distancias focales comprendidas entre  $f=20$  y  $f=50$  mm (Alameda-Hernández et al. 2019; Sturzenegger y Stead 2009), reservando la utilización de distancias focales elevadas ( $f \geq 100$  mm) para trabajos de largo alcance (1-2 km) realizados en obras de gran envergadura como, por ejemplo, minas a cielo abierto (Sturzenegger et al. 2009), taludes montañosos (Sturzenegger y Stead 2009) o movimientos en masa (Wolter et al. 2014). Empleando fotogrametría estereoscópica convencional (TDP), estos autores son capaces de caracterizar –con precisión– los macizos rocosos, obteniendo fácilmente: la posición, buzamiento, dirección de buzamiento y persistencia de los planos de discontinuidad. Sin embargo, parámetros como la apertura, el relleno y la rugosidad a pequeña escala, son actualmente menos susceptibles a las mediciones remotas, especialmente para distancias superiores a 5 m (Sturzenegger 2010).

Por ejemplo, Sturzenegger y Stead (2009) usando lentes con una distancia focal fija ( $f=50$  mm) para el estudio de 5 taludes (“highway rock cuts”) a una distancia media de 30-160 m, son capaces de obtener modelos 3D con una precisión tal que les permite caracterizar solamente la rugosidad primaria (ondulación) y la curvatura de los planos de discontinuidad. Asimismo, Wolter et al. (2014) empleando diferentes objetivos ( $f=20$ ,  $f=200$  y  $f=400$  mm) a una distancia de 100-2500 m, tampoco son capaces de analizar la rugosidad por debajo de la escala decimétrica. Por otro lado, Verma y Bourke (2019) son los únicos autores que han empleado la técnica SfM (en el campo) a corta distancia (1-2 m) para la generación de modelos 3D de bloques de roca alcanzando precisiones sub-milimétricas; no obstante, sus estudios se han centrado exclusivamente en el estudio de la erosión.

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

Por lo tanto, hoy en día, no es posible realizar un análisis preciso de la rugosidad (dentro de la escala sub-milimétrica) sin recurrir a dispositivos muy sofisticados (e.g., Wernecke y Marsh 2015) o distancia de análisis mínimas (similares a las empleadas en aplicaciones de laboratorio).

De este modo, el objetivo principal de este capítulo es analizar si el uso de la técnica SfM, en combinación con teleobjetivos de distancia focal variable, nos permite realizar un análisis preciso de la rugosidad en campo (equivalente al alcanzado con otras técnicas), desde una distancia de seguridad mínima ( $>5$  m) y con aplicación real en obra (en poco tiempo y sin apenas costes). Además, se pretende analizar, no sólo la influencia de la distancia focal en la precisión de los modelos 3D, sino también cómo varía esta precisión al aumentar la distancia de análisis.

## 5.2. Metodología SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

La Figura 58 muestra un diagrama de flujo de la metodología seguida en este capítulo para el análisis de la rugosidad de las discontinuidades de un talud a partir de modelos 3D obtenidos mediante la técnica SfM y fotografías realizadas con teleobjetivo. Como se puede observar, el flujo de trabajo consta de 4 pasos principales: (i) adquisición de una amplia serie de fotografías de las diferentes Zonas de Análisis ubicadas en el talud (efectuadas a 3 distancias: 5 – 10 – 15 m) variando la distancia focal ( $f=55$  y  $f=200$  mm); (ii) generación de las nubes de puntos 3D; (iii) extracción de los perfiles de rugosidad ( $L=300$  y  $L=100$  mm); y (iv) obtención del coeficiente JRC de cada perfil a partir del parámetro estadístico  $Z_2$ . En las siguientes secciones se mostrará información detallada sobre cada uno de estos pasos.

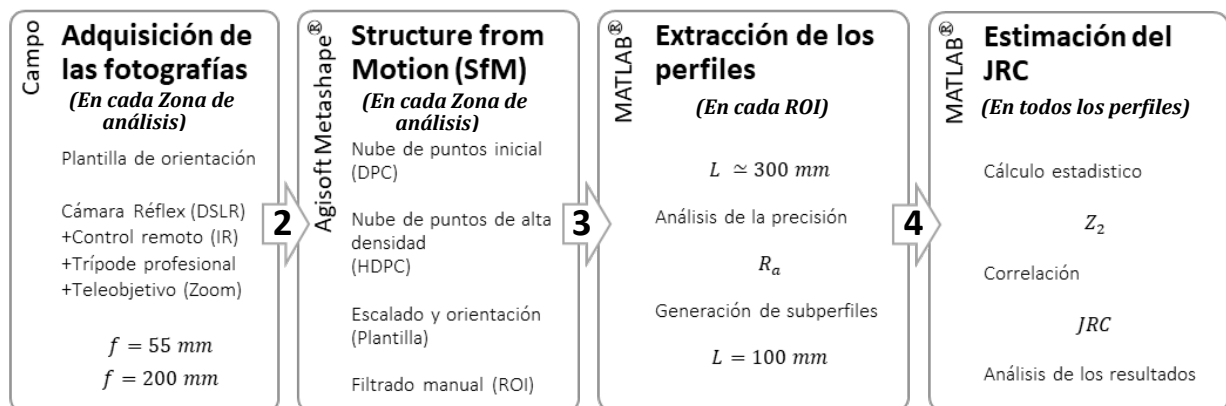


Figura 58. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la rugosidad de discontinuidades en taludes empleando la técnica SfM a larga distancia.

## 5.3. Aplicación de la metodología SfM

### 5.3.1. Descripción del talud

El talud seleccionado para realizar el estudio (Figura 59) está ubicado en el interior de una antigua explotación minera abandonada destinada a la extracción de áridos de carretera de principios del siglo XX, situada en las proximidades de la localidad de San Andrés en el norte de España (coordenadas UTM (WGS84) 30N,  $X: 257882,366\text{ m}$ ,  $Y: 4799197,793\text{ m}$ ). El macizo rocoso está constituido prácticamente en su totalidad por una serie calcárea masiva, muy compacta y resistente a la erosión, donde afloran principalmente calizas bioclásticas (Mudstone–Wackestone) y margas, pertenecientes a la formación geológica Moniello y Santa Lucia (edad Eifeliense–Emsiense, Devónico medio–inferior) [Para una descripción geológica más detallada de la zona acudir a GEODE-Z1000 (Merino-Tomé et al. 2011)]. El talud analizado cuenta con unas dimensiones aproximadas de 30 m de alto x 20 m de ancho, y todos los trabajos realizados se han efectuado en una pequeña porción de este, denominada Zona de Estudio, situada en la parte inferior del talud.

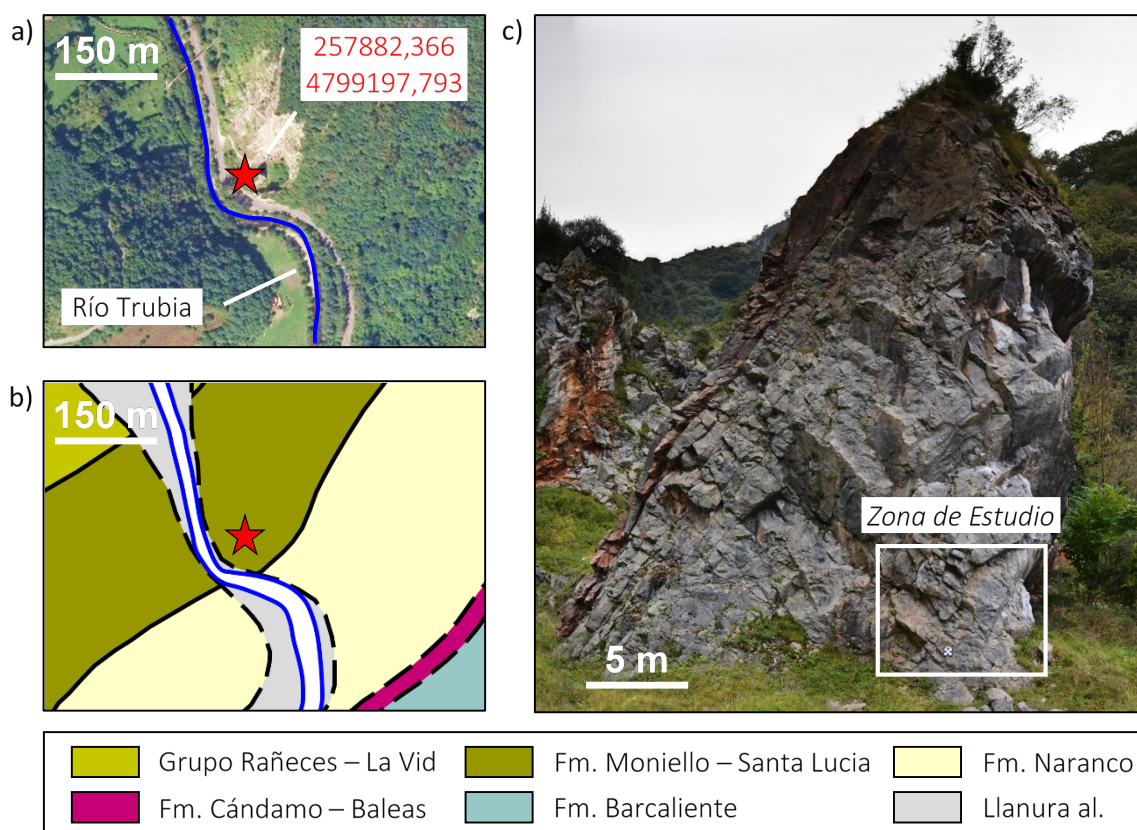


Figura 59. Localización del talud: a) Imagen satelital; b) Mapa geológico; c) Imagen de campo.

Dentro de la Zona de Estudio, se seleccionaron 4 Zonas de Análisis más pequeñas, denominadas:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$ , donde se realizarán los estudios de la rugosidad; estas ubicaciones han sido seleccionadas específicamente en función de sus características de rugosidad y la orientación de sus planos respecto al talud (Figura 60).

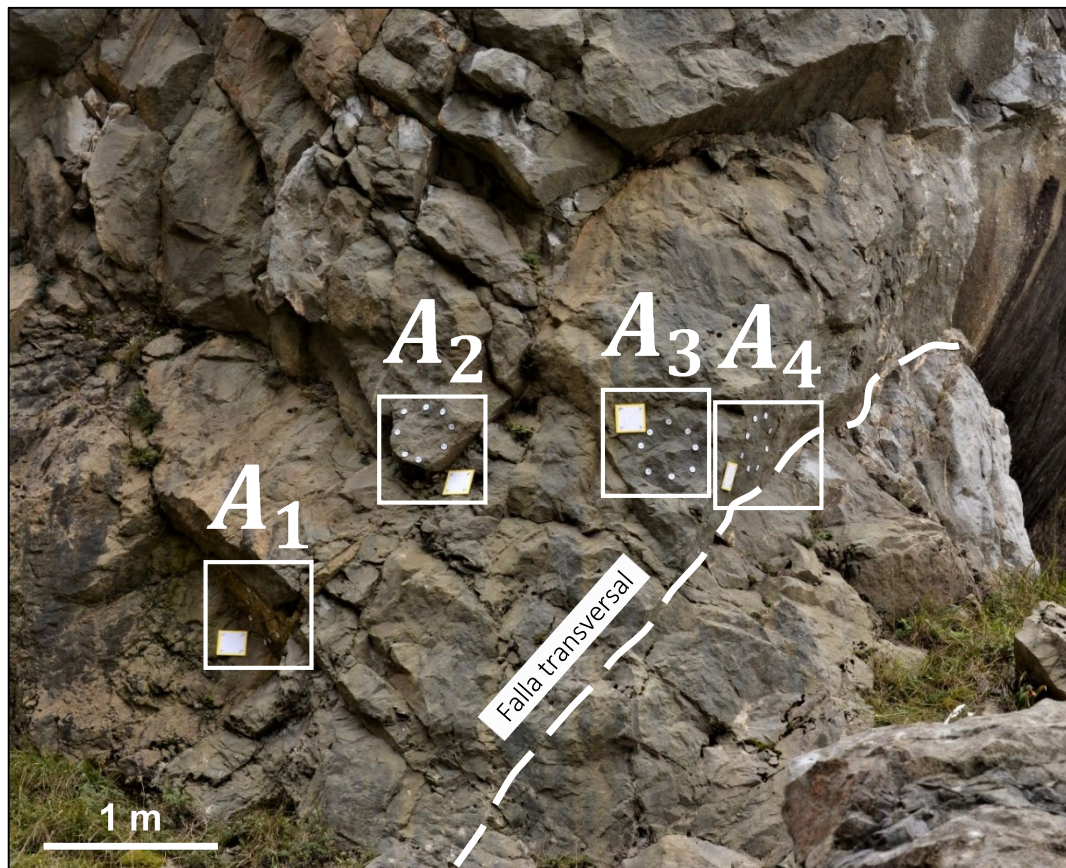


Figura 60. Imagen de campo general de la Zona de Estudio y localización de las 4 Zonas de Análisis:  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$ .

Las zonas  $A_2$  y  $A_3$  –situadas a una altura aproximada de 2 m sobre la superficie del terreno– corresponden a dos superficies sub-verticales que muestran dos planos de discontinuidad de apariencia áspera y opaca, donde la meteorización química y mecánica ha sido mayor. En contraposición, la zona  $A_1$  corresponde a un plano de discontinuidad que buza hacia el interior del talud –menos afectado por la acción de los agentes geológicos externos– que presenta “a priori” superficies con cortes más frescos e inalterados. En la zona  $A_4$  el plano de discontinuidad corresponde a una superficie de falla transversal –lisa y pulida– donde es posible observar con claridad las estrías horizontales, indicadores de la dirección de desplazamiento (ver Figura 61). Esta última zona ha sido seleccionada para poder analizar el comportamiento de la metodología propuesta sobre planos de muy baja rugosidad.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

### 5.3.2. Puntos de control

Del mismo modo que en los anteriores Capítulos 3 y 4, para poder proporcionar escala y orientación a los modelos 3D generados a partir de las imágenes obtenidas en el talud, es necesario recurrir a la utilización de GCPs de coordenadas (x, y, z) conocidas.

En este trabajo se han empleado dos tipologías de GCPs: (i) GCPs en Plantilla y (ii) GCPs Aislados (Figura 61). Cada uno de ellos sirve para un objetivo concreto: los primeros (i) se utilizarán como planos espaciales de referencia para el escalado y la orientación local de los modelos 3D (“*Plantilla de Orientación 4.0*”); y los segundos (ii) se emplearán como puntos de control (inicial y final) que delimitan físicamente los diferentes perfiles de rugosidad que serán analizados y comparados con posterioridad.

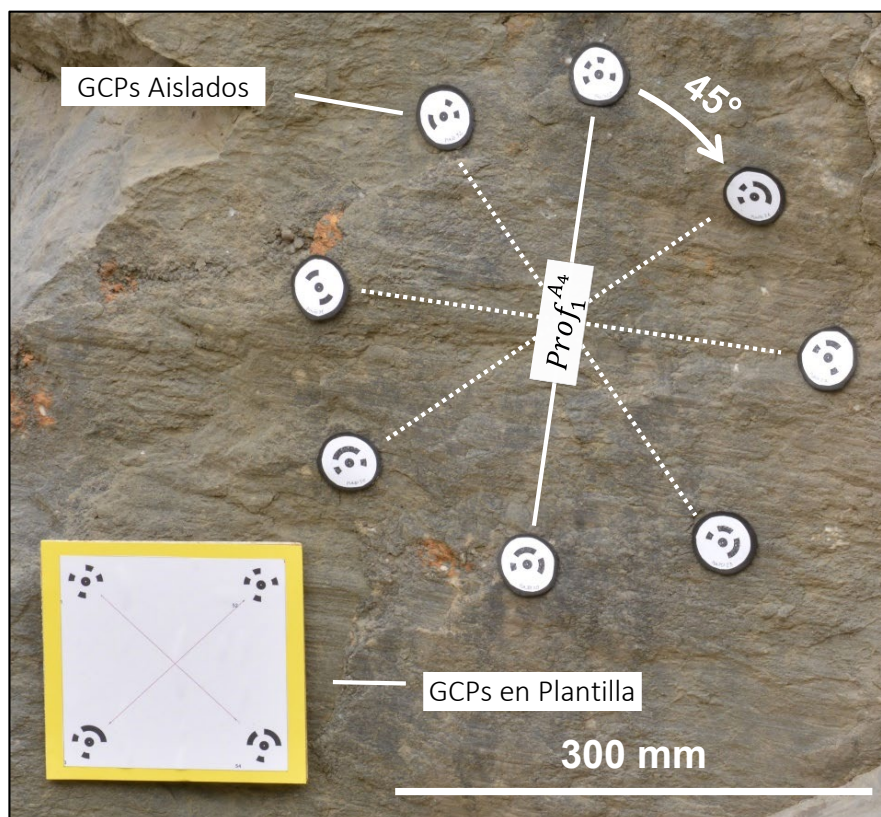


Figura 61. Imagen de detalle de la Zona de Análisis  $A_4$ , donde se muestra la ubicación de los GCPs.

Estos últimos, han sido dispuestos circularmente “en pares” de tal modo que permiten delimitar 4 perfiles longitudinales por zona ( $Prof_{i(i=1..4)}^{A_N}$ ), con 4 orientaciones en intervalos de aproximadamente  $45^\circ$ . La separación entre cada par de puntos de control aislado –que definen la dimensión de los perfiles– es de aproximadamente 300 mm, haciendo referencia a la longitud “estándar” que posee el Peine de Barton.

En esta ocasión, se han combinado los diseños de las Plantillas 2.0 y 3.0, superponiendo una Plantilla impresa en cartulina (3.0) sobre una superficie rígida construida en madera (2.0) la cual será instalada directamente sobre el talud. Esta nueva Plantilla 4.0 tiene unas dimensiones totales de 150 mm de ancho x 140 mm de largo e incluye en su interior un sistema de referencia formado por 4 GCPs impresos sobre una cartulina de color blanco, que es colocada a su vez sobre una superficie “rígida” de contrachapado (con un espesor de 5 mm) y adherida directamente al macizo rocoso con la ayuda de un adhesivo de contacto.

Los puntos de control presentes en cada Plantilla (4) han sido dispuestos de tal forma que permiten definir los dos ejes de un sistema de coordenadas bidimensional ( $x_i-y_i$ ) dentro de un plano “físico” definido por la propia plantilla. El origen del sistema se sitúa en el punto central de la propia plantilla (0,0,0) y sus ejes quedan delimitados por las proyecciones de los 4 puntos restantes.

La principal novedad incorporada en este capítulo es el uso de la Plantilla 4.0 en una posición vertical (sobre el macizo), en lugar de horizontal (sobre el terreno); esto nos permitirá: (i) reducir el número de imágenes necesarias para la generación de los modelos 3D –al prescindir del uso de fotografías exclusivas de la Plantilla– y (ii) evitar la incorporación de GCPs de validación adicionales (similares a los empleados en los frentes de excavación del Capítulo 3) que nos ayuden a medir correctamente la tercera dimensión.

Para ello (a diferencia de la metodología empleada en los anteriores capítulos) es necesario asegurarnos, en el momento de fijar la plantilla sobre el macizo, que al menos uno de sus bordes se encuentre horizontal (confirmando su horizontalidad con la ayuda de un nivel de burbuja). A continuación, procedemos directamente a caracterizar –empleando una brújula geológica– el plano que constituye la propia plantilla “in situ”; a partir de la medida de su dirección de buzamiento (DD) y buzamiento (D) (Figura 62).

De este modo, como conocemos la orientación real que ocupa el plano de referencia en el espacio (medido respecto al norte geográfico) y también disponemos de las distancias relativas entre el resto de GCPs (las dimensiones de la Plantilla son conocidas), es posible emplear esta información para recalcular las coordenadas relativas de estos puntos dentro de un sistema de coordenadas local. Por lo tanto, a partir de estas coordenadas, seremos capaces de escalar y orientar los modelos fotogramétricos en un solo paso, respetando la orientación real del talud “in situ” y sin necesidad de recurrir a dispositivos de control topográfico adicionales.

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

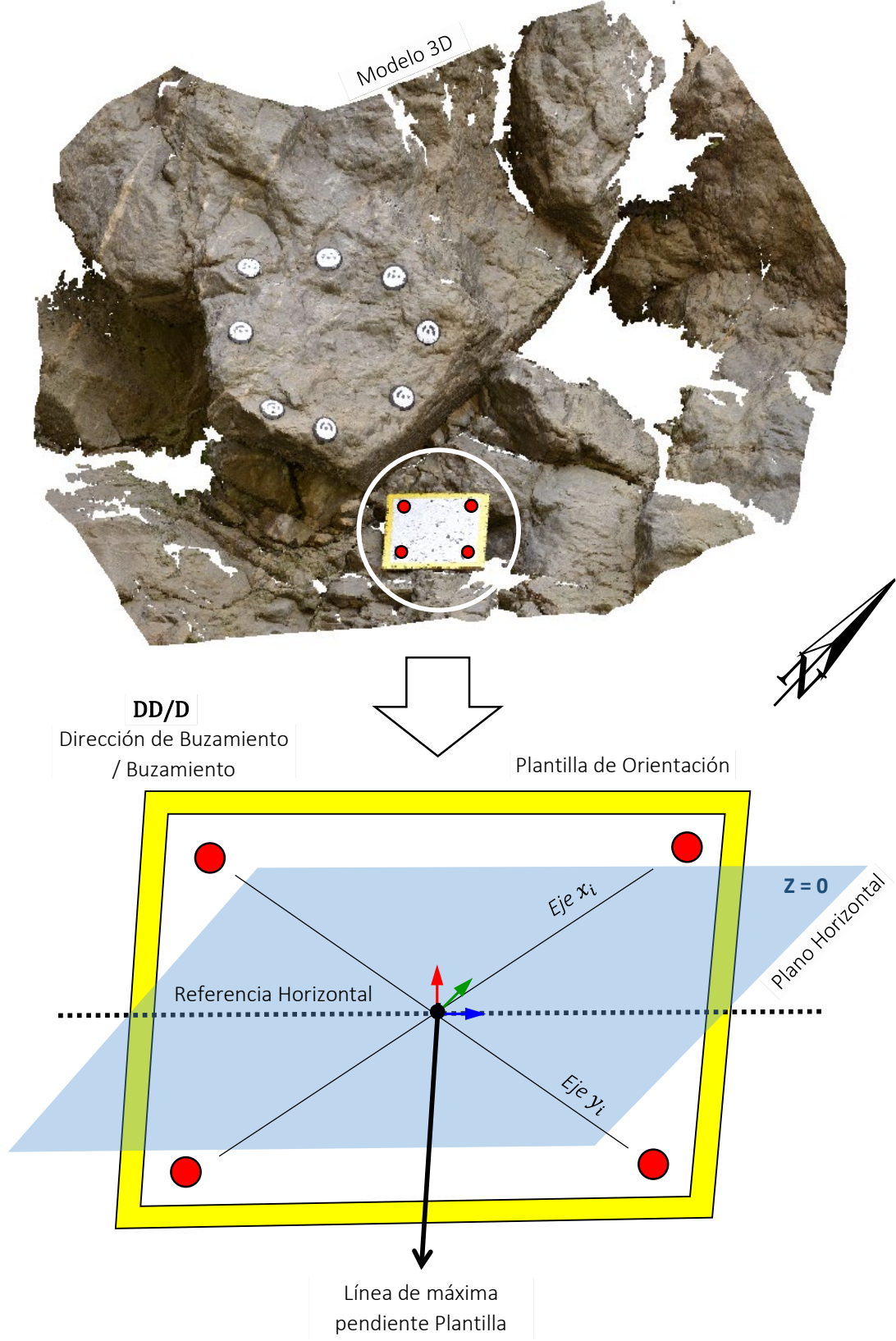


Figura 62. Detalle del funcionamiento de la Plantilla de Orientación 4.0 empleando un plano horizontal como referencia a la hora de instalar la Plantilla sobre el macizo.

Asimismo, para asegurar el correcto escalado de los modelos 3D y eliminar cualquier posibilidad de distorsión entre las nubes de puntos a la hora de compararlas entre sí, se decidió trabajar de manera aislada con cada *Zona de Análisis* ( $A_1 - A_4$ ), introduciendo una Plantilla 4.0 en cada una de ellas, situándolas lo más cerca posible a la posición de los perfiles longitudinales (delimitados por los GCPs Aislados). De este modo, en total, se situaron sobre el macizo rocoso 48 puntos de control: 16 GCPs distribuidos en 4 Plantillas y 32 GCPs Aislados (ver Figura 63).

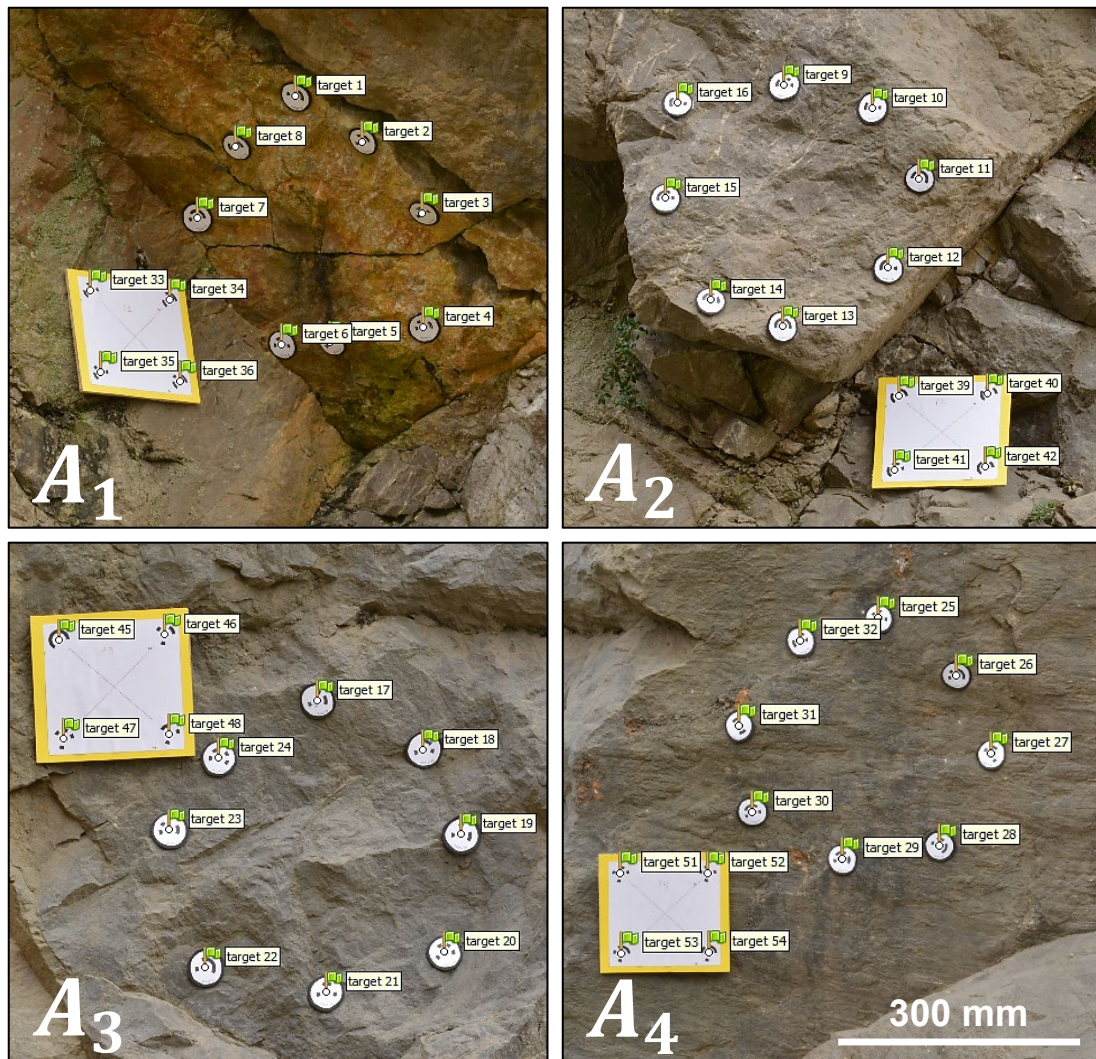


Figura 63. Imágenes en detalle de las 4 Zonas de Análisis ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$ ) donde se pueden observar los 32 GCPs Aislados (8 por zona) y los 16 GCPs incluidos en las 4 Plantillas de referencia (4 en cada una).

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

### 5.3.3. Adquisición de las imágenes

Para la adquisición de las fotografías se ha vuelto a emplear la cámara digital (modelo Nikon D5200) utilizada en el anterior capítulo (análisis de la rugosidad en muestras de laboratorio). La principal novedad incorporada en este estudio fue montar en la cámara un teleobjetivo “zoom” NIKKOR 55 – 200 mm f/4 – 5,6 G (distancia focal equivalente al formato de 35 mm: 82,5 – 300 mm) en lugar de utilizar el objetivo “estándar” de 18 – 55 mm (Figura 64).



Figura 64. Equipo fotográfico empleado para la realización de las imágenes: Nikon D5200+55–200 mm.

La principal ventaja que nos proporciona este tipo de lentes (teleobjetivo zoom) es que nos permite reducir al mínimo el número de operaciones a la hora de variar la distancia focal; evitando de este modo la necesidad de cambiar de óptica cada vez que necesitemos pasar de ángulos visuales normales ( $f = 55$  mm) a ángulos de teleobjetivo ( $f = 200$  mm). Por lo tanto, esta característica “zoom” ( $f = 55 - 200$  mm) nos permite ampliar o reducir este ángulo, de manera rápida y sencilla, simplemente girando el anillo de distancias focales de forma manual. Además, la elección de este teleobjetivo “zoom” NIKKOR 55 – 200 mm se debe a dos motivos principales: (i) el elevado precio de los super-teleobjetivos  $f > 300$  mm y (ii) la facilidad de acceso a este tipo de ópticas, ya que este teleobjetivo se ha convertido en un “standard” dentro del mercado de la fotografía, estando incluido en la mayoría de “packs de iniciación”, por lo tanto, es de muy fácil acceso para cualquier usuario/empresa que desee iniciarse en el mundo de la fotogrametría de larga distancia.

Por último, al igual que en capítulos anteriores, con el objetivo de asegurar la estabilidad del sensor durante la adquisición de las fotografías, el equipo fue instalado sobre un trípode profesional de peso elevado (modelo MT055XPRO3 de Manfrotto) y activado por control remoto con la ayuda de un mando inalámbrico.

Con el objetivo de poder analizar las posibles ventajas de la utilización de teleobjetivos (< 35° de visión) para la generación de modelos 3D de alta precisión, se realizó una campaña fotográfica de amplio espectro, efectuando para cada una de las Zonas de Análisis ( $A_1 - A_4$ ) modelos fotogramétricos dobles variando la distancia focal en cada uno de ellos entre  $f = 55$  mm (Modelos Generales: G) y  $f = 200$  mm (Modelos Teleobjetivo: T) (haciendo referencia a dos de los objetivos más comunes disponibles en el mercado de la fotografía digital:  $f = 18 - 55$  mm y  $f = 55 - 200$  mm). Asimismo, para analizar la evolución de la resolución y la precisión de los modelos 3D al aumentar la distancia de trabajo –distancia entre el sensor fotográfico y el punto de muestreo– se han empleado 3 distancias diferentes para el análisis, efectuando modelos a 5, 10 y 15 metros respecto a la posición del talud.

Además, para analizar el comportamiento de la de técnica SfM en campo (aplicada a la caracterización de la rugosidad a distancia) fue necesario la adquisición de varios modelos de detalle (Modelos D) a partir de imágenes realizadas a  $\pm 1$  m de distancia, que serán utilizados como “Modelo de Referencia” a la hora de efectuar la comparación entre las diferentes distancias focales empleadas. Por lo tanto, en este estudio se han realizado un total de 28 modelos 3D (Tabla 13) centrados en las 4 Zonas de Análisis estudiadas ( $A_1, A_2, A_3$  y  $A_4$ ).

Tabla 13. Modelos 3D generados en las Zonas de Análisis ( $A_1 - A_4$ ): (D) Detalle, (G) General y (T) Teleobjetivo (el número de imágenes empleadas se indica entre paréntesis).

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$D_{A_1}$ (25)	$D_{A_2}$ (25)	$D_{A_3}$ (25)	$D_{A_4}$ (25)
$G_{A_1}^{5m}(14) + T_{A_1}^{5m}(14)$	$G_{A_2}^{5m}(14) + T_{A_2}^{5m}(14)$	$G_{A_3}^{5m}(14) + T_{A_3}^{5m}(14)$	$G_{A_4}^{5m}(14) + T_{A_4}^{5m}(14)$
$G_{A_1}^{10m}(14) + T_{A_1}^{10m}(14)$	$G_{A_2}^{10m}(14) + T_{A_2}^{10m}(14)$	$G_{A_3}^{10m}(14) + T_{A_3}^{10m}(14)$	$G_{A_4}^{10m}(14) + T_{A_4}^{10m}(14)$
$G_{A_1}^{15m}(14) + T_{A_1}^{15m}(14)$	$G_{A_2}^{15m}(14) + T_{A_2}^{15m}(14)$	$G_{A_3}^{15m}(14) + T_{A_3}^{15m}(14)$	$G_{A_4}^{15m}(14) + T_{A_4}^{15m}(14)$

Se aplico la misma metodología para la adquisición de las imágenes de los modelos G (General) y T (Teleobjetivo): efectuando un barrido semicircular alrededor del talud fotografiando cada una de las Zonas de Análisis ( $A_1, A_2, A_3$  y  $A_4$ ) desde 7 posiciones diferentes, manteniendo constante tanto la separación entre posiciones, como la distancia respecto a la zona de análisis (5, 10 y 15 m) (Figura 65).

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

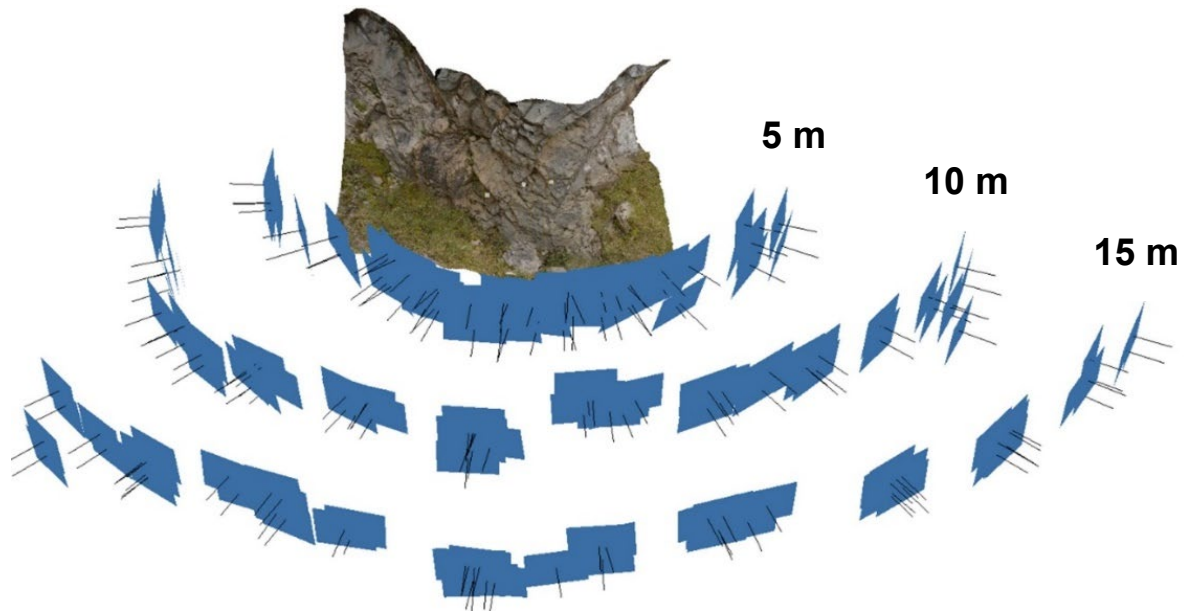


Figura 65. Posiciones de cámara (en azul) de las fotografías empleadas para la generación de los modelos G y T.

Desde cada una de las posiciones, se realizó, en primer lugar, 1 imagen doble (2 imágenes consecutivas) a una altura de 1,80 m, fijando la distancia focal del objetivo a 55 mm; para posteriormente, sin mover la cámara, girar manualmente el anillo del “zoom” hasta alcanzar los 200 mm y adquirir dos nuevas imágenes desde la misma altura. A continuación, se repitió el mismo proceso reduciendo la altura del trípode a 0,80 m. (Para minimizar las posibilidades de adquirir imágenes defectuosas –con ruido y/o desenfocadas– se realizaron imágenes “dobles” disparando 2 fotografías consecutivas en lugar de una sola, para posteriormente elegir entre cada par de imágenes la que posea mayor calidad; de este modo, aseguramos la adquisición de imágenes de máxima calidad 100 % nítidas.)

En total, se ubicó la cámara en 84 posiciones diferentes (4 Zonas de Análisis x 7 posiciones x 3 distancias) desde las cuales se realizaron un total de 672 fotografías desde dos alturas diferentes (1,8 m y 0,80 m) empleando dos distancias focales (55 mm y 200 mm), seleccionando finalmente la mitad (336) para la generación de los modelos G y T (ver la Tabla 13 para observar el número de imágenes empleadas para la generación de cada uno de los modelos).

Para la generación del modelo de detalle (D) se optó por reducir el número de posiciones de cámara a 5 y aumentar ligeramente el número de imágenes por posición (5). En total, se emplearon 25 fotografías dobles en cada Zona de Análisis –eligiendo para cada par la fotografía de más calidad–, para así obtener un modelo 3D más sólido que caracterice a la perfección las superficies de estudio (Figura 66).

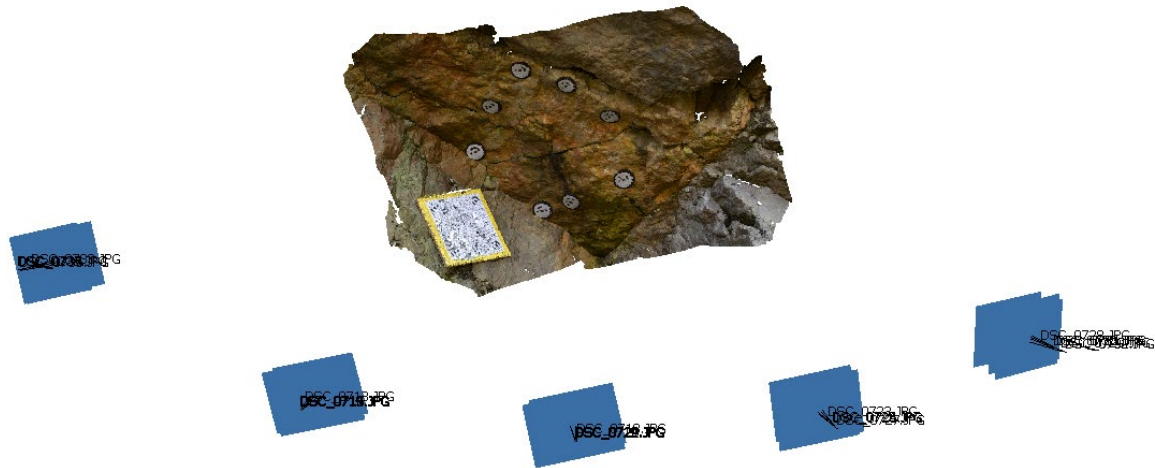


Figura 66. Posiciones de cámara (en azul) para la generación del modelo de detalle (D) de la Zona de Análisis  $A_1$ .

Todas las imágenes fueron obtenidas con la máxima resolución posible (24MP, 3:2; píxeles efectivos 6000 x 4000; formato JPEG) manteniendo los ajustes de cámara fijos: Modo manual (M), Enfoque automático (AF), Medición ponderada al centro, Apertura f/22, Velocidad de obturación 1/4" y ISO 100; comunes a ambas distancias focales (55 y 200 mm). Estos parámetros fueron definidos con anterioridad a la toma de datos, en función de las condiciones lumínicas presentes en el talud en el momento de la toma de los datos; examinando a través de varias pruebas el ajuste óptimo del dispositivo (capaz de homogeneizar el enfoque en todo el encuadre y ampliar al máximo la profundidad de campo).

En este sentido, cabe destacar que a diferencia de los dispositivos láser LiDAR (sistema activo) la técnica fotogramétrica SfM sí se ve afectada por la iluminación (registran la energía electromagnética radiante, en este caso, la luz natural), por lo tanto, a la hora de plantear la campaña de campo, hay que tener en cuenta las condiciones climáticas en relación con los tiempos de toma de datos, para que las imágenes sean todas iguales y posean la misma intensidad y color (facilitando la labor al programa a la hora de determinar puntos homólogos) y poder trabajar con ajustes de cámara fijos. (Notar que, a diferencia de los Capítulos 3 y 4, en este estudio, las imágenes fueron adquiridas “en el exterior” dentro de un ambiente natural, donde no es posible controlar las condiciones de iluminación.)

En esta ocasión, el día de la toma de datos, el cielo estaba nublado, lo que evito la generación de zonas de sombra en el talud. No obstante, debido a la larga duración de la campaña planteada, durante la adquisición de las imágenes para el modelo de comparación (D) fue necesario aumentar ligeramente el tiempo de exposición (de 1/4" a 1") debido a un descenso en los niveles de intensidad de la luz ambiental diurna causados por el comienzo del atardecer.

### 5.3.4. Generación de los modelos 3D

La Tabla 14 muestra, a modo de ejemplo, los tiempos de procesado en Agisoft Metashape para la generación de los 7 modelos 3D (DPC + HDPC) realizados en la Zona de Análisis  $A_1$ . En esta ocasión, se han empleado 2 calidades de procesamiento (media y alta) con el objetivo de analizar su efecto en el estudio de la rugosidad en campo, y determinar, si el aumento en los tiempos de procesado (calidad alta) está justificado y contribuye a mejorar los resultados. Notar que, a diferencia de las aplicaciones de laboratorio mostradas en el Capítulo 4 (donde el control de las condiciones de iluminación y adquisición de las fotografías se realizó dentro de un escenario 100 % controlado), las aplicaciones de este análisis “en campo” empleando fotogrametría estereoscópica convencional han reportado en la literatura –y nuestros resultados confirman estas observaciones– que un aumento en calidad de procesamiento puede dar lugar a la introducción de “ruido” en los modelos 3D (Sturzenegger 2010) dando como resultado la generación de “rugosidades artificiales” que contribuyen a una sobrestimación del índice JRC (Kim et al. 2013).

Tabla 14. Tiempos de procesado para la generación de los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis  $A_1$ .

Precisión	Nube de puntos	$D_{A_1}$	$G_{A_1}^{5m}$	$T_{A_1}^{5m}$	$G_{A_1}^{10m}$	$T_{A_1}^{10m}$	$G_{A_1}^{15m}$	$T_{A_1}^{15m}$
Media	DPC	3 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min
	HDPC	57 min	41 min	29 min	25 min	28 min	15 min	21 min
Alta	DPC	3 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min
	HDPC	6 h 36 min	5 h	3 h 48 min	3 h 7 min	3 h 11 min	1 h	2 h 22 min

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 14, es posible observar que los tiempos de procesado alcanzados empleando una precisión “media” en Agisoft Metashape reduce en aproximadamente 1/6 los tiempos de computación en comparación con una calidad de computación “alta”.

De este modo, con el objetivo de reducir las posibilidades de obtener “ruido” en nuestros modelos y reducir los tiempos de procesado en gabinete, en este capítulo hemos decidido trabajar con una calidad de procesamiento media para la generación de ambas nubes: DPC y HDPC.

Por último, notar que, al igual que en los anteriores capítulos de la presente tesis (Capítulo 3 y Capítulo 4) todos los cálculos se realizaron en este estudio han sido realizados utilizando un solo núcleo de una computadora Intel Core i7 – 6700 (procesador de 3,4 GHz y 16 GB de RAM) ejecutando el sistema operativo Windows.

Una vez generados todos los modelos 3D (28 HDPC, ver Tabla 13) estos han sido escalados y orientados dentro del propio programa Agisoft Metashape con la ayuda de las coordenadas de los 4 puntos de control (GCPs) presentes en cada una de las 4 Plantillas de Orientación 4.0 introducidas en las 4 Zonas de Análisis ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$ ); calculadas a partir de las orientaciones que toman dichas Plantillas una vez situadas sobre el macizo. La Tabla 15 muestra, como ejemplo, los errores promedio (x, y, z) de las coordenadas relativas de los GCPs proporcionadas por la plantilla para la Zona de Análisis  $A_1$ . De nuevo, estos errores surgen al comparar las coordenadas “reales” introducidas en el programa, con las coordenadas proporcionadas por el mismo una vez generado los modelos.

Tabla 15. Errores medios [mm] de las coordenadas (x, y, z) de los 4 GCPs incluidos en la Plantilla de Orientación empleada en los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis  $A_1$ .

Coordenada	$D_{A_1}$	$G_{A_1}^{5m}$	$T_{A_1}^{5m}$	$G_{A_1}^{10m}$	$T_{A_1}^{10m}$	$G_{A_1}^{15m}$	$T_{A_1}^{15m}$
X	0,037	0,021	0,006	0,261	0,016	0,072	0,047
Y	0,043	0,011	0,029	0,174	0,031	0,065	0,060
Z	0,123	0,126	0,077	0,323	0,087	0,166	0,090

Como se puede observar en la Tabla 15 los modelos 3D que emplean imágenes efectuadas con teleobjetivo (T) muestran unos errores inferiores a los proporcionados por los modelos generales (G). A su vez, estos errores, aumentan progresivamente en ambos modelos (G y T) al aumentar la distancia de análisis.

No obstante, cabe destacar que según nos alejamos de la zona de análisis ( $T_{A_1}^{10m}$ ,  $G_{A_1}^{15m}$  y  $T_{A_1}^{15m}$ ) el número de proyecciones aumenta, es decir, aumenta el número de imágenes donde es posible observar todos los GCPs presentes en la Zona de Análisis  $A_1$ ; esto es debido a que en los primeros modelos ( $D$ ,  $G_{A_1}^{5m}$ ,  $T_{A_1}^{5m}$  y  $G_{A_1}^{10m}$ ) la relación distancia focal / distancia al objeto no permite capturar en la misma imagen los 4 GCPs de la Plantilla a la vez. Por lo tanto, aunque en términos generales se mantenga la tendencia: a mayor distancia, mayor error; es necesario indicar que no todos los modelos poseen fotografías con el mismo número de GCPs visibles.

### 5.3.5. Edición de los modelos 3D para la extracción de los perfiles

El siguiente paso, previo a la extracción de los perfiles de rugosidad, es la preparación y edición de los modelos 3D generados en Agisoft Metashape, con el objetivo de (i) aligerar el peso computacional de las nubes de puntos de alta densidad, y (ii) focalizar el análisis en las secciones de las mismas donde se efectuará el estudio de la rugosidad. Para ello, al igual que en Capítulo 3, se han definido varias “Regiones de Interés” (ROIs) –aplicando un ligero recorte en Agisoft Metashape– alrededor de las regiones de las HDPC que contienen los GCPs aislados. (Notar que, de esta forma, se eliminan las zonas de macizo que no proporcionan información relevante para este estudio.)

A continuación, una vez delimitada las ROIs de cada modelo, las nubes de puntos resultantes han sido exportadas a MATLAB para la extracción de los perfiles de rugosidad a partir de las coordenadas relativas proporcionadas por los 8 GCPs aislados incluidos en cada una de las Zonas de Análisis ( $A_1 - A_4$ ). De este modo, en cada ROI se han obtenido 4 perfiles de aproximadamente 300 mm de longitud, denominados  $Prof_{i(i=1..4)}^{A_N}$ ; donde  $A_N$  indica la Zona de Análisis a la que pertenece el perfil ( $A_1, A_2, A_3$  o  $A_4$ ), y  $i(i = 1..4)$  hace referencia a las cuatro orientaciones diferentes que toma el perfil (ver Figura 61 y Sección 5.3.2 para más información). Por lo tanto, al haber siete modelos por cada una de las 4 ROIs seleccionadas (ver Tabla 13), se han obtenido un total de 112 perfiles (7 Modelos x 4 Zonas de Análisis x 4 Perfiles) que serán empleados para efectuar el posterior análisis de la rugosidad.

## 5.4. Resultados y discusión

### 5.4.1. Análisis de la precisión de los modelos

A diferencia del capítulo anterior (caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corto alcance), en esta ocasión, y en vista de los resultados obtenidos en el Capítulo 3 a partir del análisis de los perfiles adquiridos con el “Peine de Barton”, se ha decidido prescindir de la utilización de métodos manuales (subjetivos) para analizar la precisión de los modelos 3D generados en campo. No obstante, como ya se ha comentado con anterioridad en la Sección 5.3.3 del presente capítulo, para analizar el comportamiento (y evolución) de los modelos 3D generados, se ha optado por la generación de varios “Modelos de Referencia” (Modelos D) adquiridos a corta distancia ( $\pm 1$  m).

De este modo, los perfiles extraídos de estos Modelos serán empleados como “Perfiles de Referencia” a la hora de analizar la precisión de los modelos G (General) y T (Teleobjetivo); comparando los perfiles obtenidos de estos modelos con sus correspondientes “perfiles de referencia” extraídos a partir de los Modelos de Detalle (D).

La Figura 67 muestra, a modo de ejemplo, una comparación para uno de estos perfiles ( $Prof_3^{A_1}$ ) para la Zona de Análisis  $A_1$ , extraído de los modelos D, G y T, donde es posible observar su evolución al aumentar la distancia de análisis (5, 10 y 15 m). A partir de esta comparación es posible observar “a simple vista” que los perfiles generados a partir de los modelos T (en color azul) se adaptan mucho mejor a los perfiles referencia D (en color rojo) que los perfiles obtenidos de los modelos G (en color verde); siendo prácticamente idénticos incluso para los modelos generados a 15 m de distancia. Sin embargo, las diferencias mostradas entre los perfiles D y G, tienden a hacerse mayores al aumentar la distancia de análisis.

Sin embargo, al igual que en capítulo anterior, se ha decidido emplear la fórmula de la rugosidad media ( $R_a$ ) para poder analizar estas diferencias de manera cuantitativa. Para ello, en esta ocasión, los “perfiles diferencia” se han obtenido a partir de la “resta” de los perfiles procedentes de los modelos (D) y sus equivalentes correspondientes a los modelos G y T (ver Sección 4.4.1 del Capítulo 3 para más información).

La Tabla 16 muestra, a modo de ejemplo, los valores de  $R_a$  para los 4 “perfiles diferencia” que corresponden a los modelos 3D generados en la Zona de Análisis  $A_1$  ( $Prof_{1-4}^{A_1}$ ). (Notar que, de nuevo, si no existiera ninguna diferencia entre los modelos D, G y T, el valor que tomaría el parámetro  $R_a$  sería igual a 0.)

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

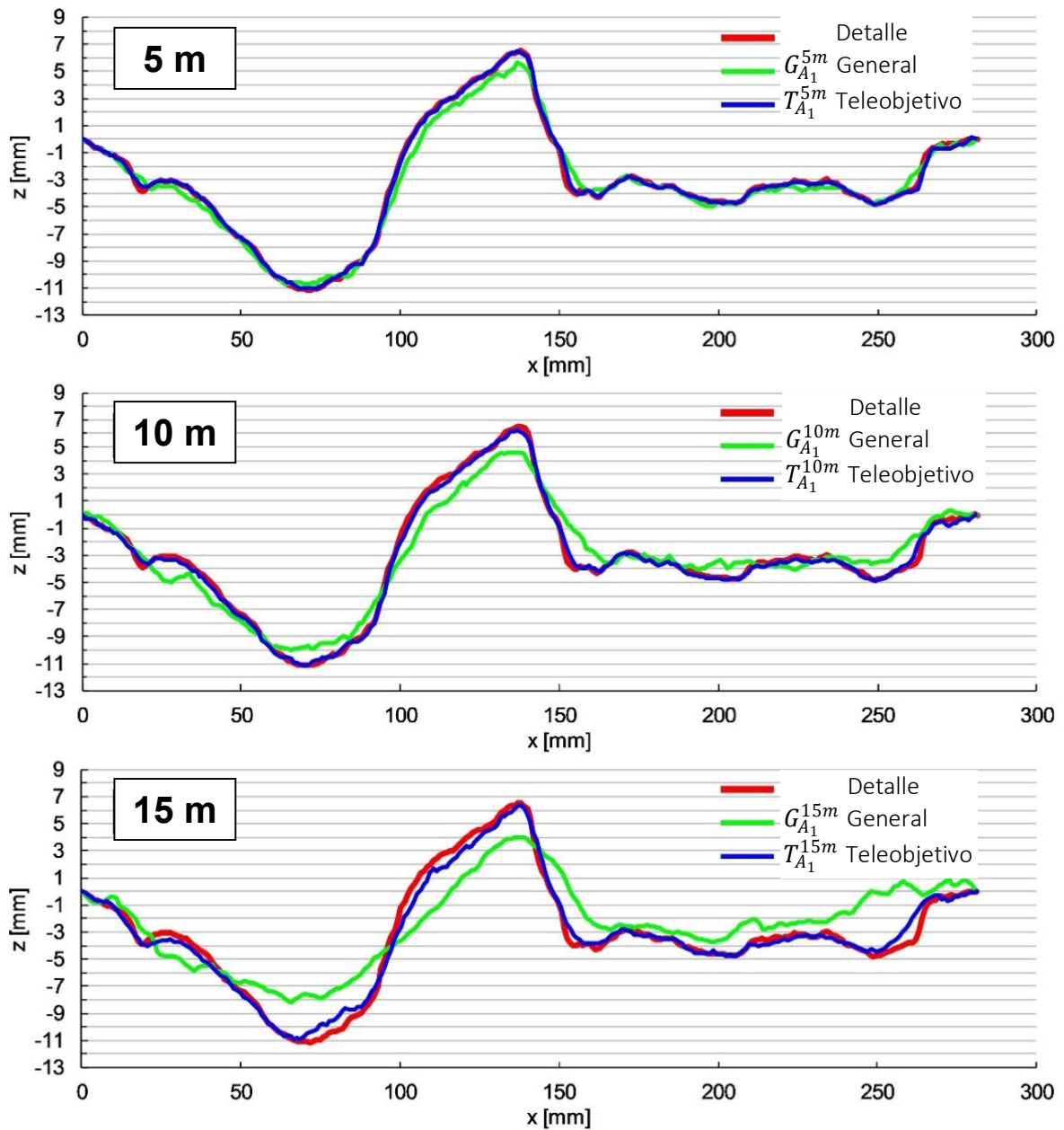


Figura 67. Comparación visual entre los perfiles extraídos de los modelos G y T, generados a 5, 10 y 15 m de distancia, y su perfil equivalente obtenido del modelo de detalle (D), para el  $Prof_3^{A_1}$  incluido en la Zona de análisis  $A_1$ .

Analizando los valores mostrados en la Tabla 16, se puede observar que los perfiles obtenidos a partir de los modelos T, proporcionan valores  $R_a$  más próximos a 0 que los perfiles obtenidos a partir de los modelos G; confirmando, de este modo, las observaciones visuales mostradas en la Figura 67.

Tabla 16. Rugosidad media ( $R_a$ ) de los “Perfiles diferencia”  $Prof_{1-4}^{A_1}$  de los modelos 3D realizados en la Zona de Análisis  $A_1$ .

Perfil	$R_a$ [mm]					
	$G_{A_1}^{5m}$	$T_{A_1}^{5m}$	$G_{A_1}^{10m}$	$T_{A_1}^{10m}$	$G_{A_1}^{15m}$	$T_{A_1}^{15m}$
$Prof_1^{A_1}$	0,50	0,11	1,13	0,26	1,29	0,44
$Prof_2^{A_1}$	0,47	0,12	0,87	0,27	1,30	0,39
$Prof_3^{A_1}$	0,43	0,14	0,89	0,22	1,82	0,40
$Prof_4^{A_1}$	0,56	0,14	0,96	0,29	1,70	0,44

Adicionalmente, este análisis se ha extendido al resto de Zonas de Análisis ( $A_1 - A_4$ ) considerando todos los perfiles extraídos. Estos resultados se muestran en la Tabla 17, indicando el  $\overline{R_a}$  promedio de los 4 perfiles ( $Prof_{i(i=1..4)}^{A_n}$ ) obtenidos para cada uno de los modelos 3D generados en las 4 Zonas de Análisis estudiadas ( $G_{A_n}^{5m}$ ,  $T_{A_n}^{5m}$ ,  $G_{A_n}^{10m}$ ,  $T_{A_n}^{10m}$ ,  $G_{A_n}^{15m}$  y  $T_{A_n}^{15m}$ ). De nuevo, los resultados confirman la tendencia mostrada anteriormente: los perfiles obtenidos con teleobjetivo (T) se adaptan mejor a los perfiles diferencia (D) que los perfiles generales (G), independientemente del tipo de zona y de la distancia de análisis empleada (5, 10 o 15 m).

Tabla 17. Rugosidad media promedio ( $\overline{R_a}$ ) de los “Perfiles diferencia”  $Prof_{1-4}^{A_n}$  de los modelos 3D realizados en todas las Zonas de Análisis estudiadas ( $A_1 - A_4$ ).

Zona de Análisis	$\overline{R_a}$ [mm]					
	$G_{A_1}^{5m}$	$T_{A_1}^{5m}$	$G_{A_1}^{10m}$	$T_{A_1}^{10m}$	$G_{A_1}^{15m}$	$T_{A_1}^{15m}$
$A_1$	0,49	0,13	0,96	0,26	1,53	0,42
$A_2$	0,62	0,20	1,42	0,30	2,34	0,49
$A_3$	0,47	0,20	1,09	0,29	1,82	0,41
$A_4$	0,31	0,09	0,55	0,18	0,88	0,26

### 5.4.2. Estimación del JRC

Una vez obtenidos los perfiles de las nubes de puntos de alta densidad, y analizada la calidad de los modelos 3D generados, se ha procedido al análisis de la rugosidad (en términos de JRC) a partir de su estimación empleando, de nuevo, las correlaciones propuestas por Li y Zhang (2015) y el parámetro estadístico  $Z_2$ . (Notar que, a la vista de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, la metodología desarrollada para la estimación del coeficiente JRC –a partir de la información espectral de los perfiles– aún no ha proporcionado la robustez suficiente para su aplicación “en campo”. Por lo tanto, en este capítulo, se ha preferido continuar con un enfoque estadístico y dejar, para futuras investigaciones, la aplicación frecuencial.)

Sin embargo, es necesario recordar que las formulaciones propuestas por Li y Zhang (2015) solamente estaban validadas para un determinado rango de longitudes ( $L \in [72 - 119,6 \text{ mm}]$ ) y un determinado rango de rugosidades ( $Z_2 \in [0,074 - 0,433]$ ). Además, como el  $Z_2$  obtenido de los perfiles depende de la distancia de muestreo empleada, los autores solo validan sus ecuaciones para una distancia de muestreo de 0,4 mm.

Por lo tanto, para cumplir con estas condiciones, se ha subdividido cada uno de los 112 perfiles analizados en este trabajo ( $L \approx 300 \text{ mm}$ ) en 3 sub-perfiles más pequeños de ( $L = 100 \text{ mm}$ ) (ver Figura 68) y establecer una frecuencia de muestreo de  $2,5 \text{ mm}^{-1}$  (1/0,4) a la hora de extraer los perfiles de las nubes de puntos de alta densidad incluidas en las ROIs.

Esta subdivisión, ha dado como resultado la generación de 336 perfiles de rugosidad (7 Modelos x 4 Zonas de Análisis x Perfiles x 4 sub-perfiles) que serán empleados en el posterior análisis.

No obstante, a pesar de lo anterior, en sus conclusiones Li y Zhang (2015) remarcan la necesidad de estudiar la influencia del efecto escala en sus resultados: asumiendo que en sus investigaciones solamente han empleado perfiles con un rango de longitudes muy limitado. Por lo tanto, recomiendan la realización de estudios adicionales que empleen diferentes perfiles (con diferentes tamaños y longitudes) con el objetivo de ampliar (y ajustar) el rango de aplicación de sus correlaciones

En este sentido, en este trabajo, se ha decidido incluir en el análisis los 112 perfiles originales ( $L \approx 300 \text{ mm}$ ) para poder observar el comportamiento de la formulación propuesta por los autores en perfiles con una longitud superior a 100 mm. De este modo, el análisis realizado en este capítulo incluye un total de 448 perfiles: 112 perfiles con  $L = 100 \text{ mm}$  + 336 perfiles con  $L \approx 300 \text{ mm}$ .

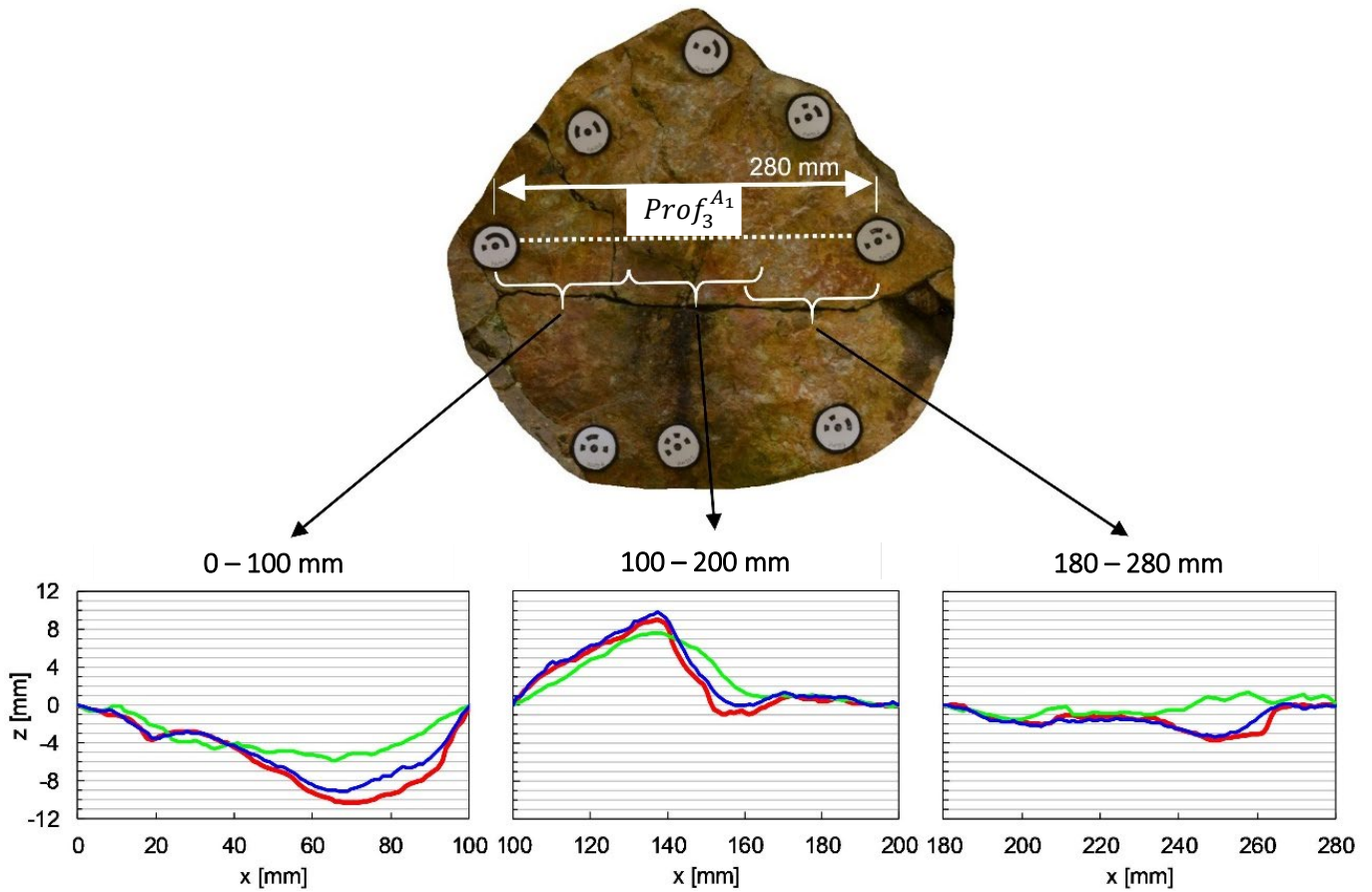


Figura 68. Ejemplo de los 3 sub-perfiles ( $L = 100 \text{ mm}$ ) obtenidos a partir de la subdivisión del perfil original  $Prof_3^{A_1}$ , generado a una distancia de 15 m, mostrado en la Figura 67. (Notar que, como la longitud total del perfil es ligeramente inferior a 300 mm ( $L = 280 \text{ mm}$ ), existe un pequeño solapamiento entre los sub-tramos intermedio y final.)

Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

La Tabla 18 muestra, a modo de resumen, los valores medios del coeficiente JRC para los 3 sub-perfiles obtenidos a partir de los perfiles originales calculados a partir de las correlaciones propuestas por Li y Zhang (2015). De manera adicional, también se incluyen en la tabla los valores  $\overline{JRC}$  obtenidos en cada Zona de Análisis ( $A_1 - A_4$ ). Estos resultados permiten comparar (i) los resultados proporcionados por los modelos G y T obtenidos a partir de diferentes distancias, con (ii) los valores de referencia proporcionados por los modelos D.

Tabla 18. Valores medios  $JRC$  calculados para los 3 sub-perfiles ( $L = 100\text{ mm}$ ) en los que se ha subdivido cada uno de los perfiles analizados  $Prof_{i(i=1..4)}^{A_n}$  (entre paréntesis se indican las diferencias medias  $\overline{JRC}$  respecto a los valores de referencia ( $D$ ) obtenidos de los modelos de detalle).

Zona de Análisis	Perfil	$JRC$ [Valor medio de los 3 sub-perfiles]						
		$D_{A_n}$	$G_{A_n}^{5m}$	$T_{A_n}^{5m}$	$G_{A_n}^{10m}$	$T_{A_n}^{10m}$	$G_{A_n}^{15m}$	$T_{A_n}^{15m}$
$A_1$	$Prof_1^{A_1}$	11	5	9	4	7	5	5
	$Prof_2^{A_1}$	12	8	10	7	8	6	8
	$Prof_3^{A_1}$	11	9	10	8	10	6	9
	$Prof_4^{A_1}$	15	9	13	8	11	5	10
	$\overline{JRC}$	12	8 (-4)	11 (-1)	7 (-5)	9 (-3)	6 (-6)	8 (-4)
$A_2$	$Prof_1^{A_2}$	15	10	16	7	14	9	11
	$Prof_2^{A_2}$	10	7	10	6	9	5	7
	$Prof_3^{A_2}$	12	7	12	5	9	4	10
	$Prof_4^{A_2}$	13	6	12	4	8	4	8
	$\overline{JRC}$	13	7 (-6)	12 (-1)	6 (-7)	10 (-3)	6 (-7)	9 (-4)
$A_3$	$Prof_1^{A_3}$	15	11	15	8	14	8	12
	$Prof_2^{A_3}$	11	8	12	7	10	7	9
	$Prof_3^{A_3}$	8	7	8	5	7	6	7
	$Prof_4^{A_3}$	14	12	14	10	13	9	12
	$\overline{JRC}$	12	10 (-2)	12 (0)	8 (-4)	11 (-1)	7 (-5)	10 (-2)
$A_4$	$Prof_1^{A_4}$	5	5	4	4	4	4	5
	$Prof_2^{A_4}$	5	4	5	4	4	2	5
	$Prof_3^{A_4}$	4	3	3	4	3	4	4
	$Prof_4^{A_4}$	8	5	7	5	5	6	5
	$\overline{JRC}$	5	4 (-1)	5 (0)	4 (-1)	4 (-1)	4 (-1)	5 (0)
<b>Media total</b>		11	7 (-4)	10 (-1)	6 (-5)	9 (-2)	6 (-5)	8 (-3)

Se puede observar que, en prácticamente la totalidad de los casos mostrados en la Tabla 18, los valores JRC proporcionados por los modelos efectuados con teleobjetivo (T) están más próximos a los coeficientes JRC del modelo de referencia (D) que los calculados a partir de los modelos generales (G). Si consideramos los valores promedio  $\overline{JRC}$  totales (última fila de la Tabla 18), es posible observar que, a 5 metros de distancia, los modelos ( $T^{5m}$ ) están solamente 1 punto por debajo de los resultados de los modelos (D), mientras que los modelos ( $G^{5m}$ ) están 4 puntos por debajo de los mismos. Esta tendencia se mantiene prácticamente constante al aumentar la distancia de trabajo a 10 y 15 m, con diferencias medias de -2 y -3 puntos, respectivamente, para los modelos  $T^{10m}$  y  $T^{15m}$ ; y de -5 y -5 puntos para los modelos  $G^{10m}$  y  $G^{15m}$ .

Por otro lado, solamente se observan tres casos ( $Prof_1^{5m}$ ,  $Prof_3^{10m}$  y  $Prof_4^{15m}$ ) en los que los valores dados por los modelos (G) se aproximan más a los resultados del modelo (D) que los de los modelos (T). Estos casos corresponden con tres perfiles ubicados en la Zona de Análisis  $A_4$  donde, como era de esperar (según se ha comentado en la Sección 5.3.1), la rugosidad es claramente inferior a la del resto de zonas del talud ( $4 \leq JRC \leq 8$ ).

Estos resultados nos permiten indicar que, al aumentar la distancia de análisis (de 5 a 10 y 15 m), los valores estimados del JRC disminuyen (es decir, disminuye la rugosidad de los perfiles obtenidos a partir de los modelos 3D); tanto para los modelos (G) como para los modelos (T). (Existe un caso ( $Prof_2^{A_3}$ ) en el que la rugosidad proporcionada por el modelo  $T^{5m}$  es superior a la proporcionada por el modelo (D), no obstante, esta diferencia (+1) está dentro del rango de error (-1) proporcionado por el resto de los modelos (T) efectuados a 5 m de distancia.)

No obstante, esta disminución (en términos de JRC) es debida a un efecto fotográfico: si no aumentamos la distancia focal al aumentar la distancia de análisis la resolución de los modelos 3D disminuye (Haneberg 2007; Wolter et al. 2014). Este efecto, tiene como resultado la generación de nubes de puntos cada vez menos densas a partir de las cuales se extraen perfiles de rugosidad cada vez más suavizados (con menos grado de detalle) dando como resultados la obtención de coeficientes JRC cada vez más bajos.

Por último, la Figura 69 muestra gráficamente el análisis realizado, representando, para cada una de las distancias consideradas (5, 10 y 15 m), los ajustes entre los valores JRC de referencia –calculados a partir de los modelos D– y los proporcionados por los modelos G y T, para todos los sub-perfiles analizados ( $L = 100 \text{ mm}$ ).

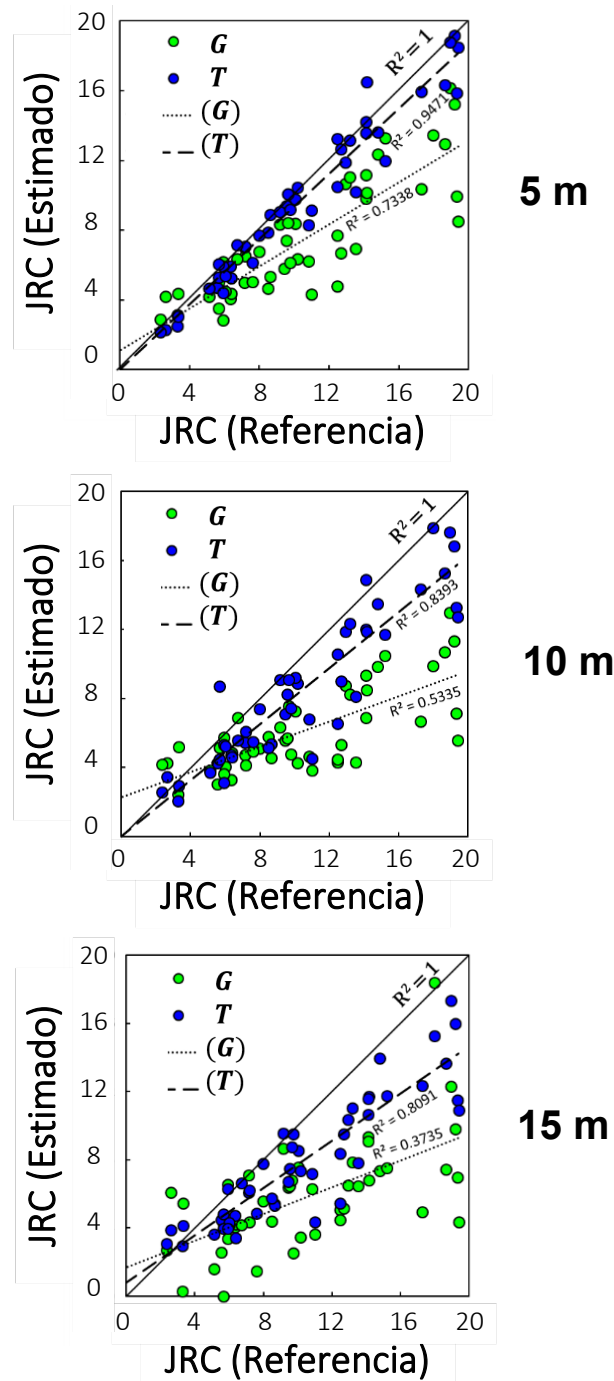


Figura 69. Comparación entre los valores JRC obtenidos de los modelos (G) y (T) y los obtenidos de los modelos de detalle (D) para los perfiles  $L = 100 \text{ mm}$ .

Como se puede observar en las gráficas mostradas en la Figura 69, el ajuste proporcionado por los modelos (T) –a través de las líneas de tendencia que unen los marcadores de color azul– es siempre superior (más próximo a la diagonal,  $R^2 = 1$ ) que el proporcionado por los modelos (G), independientemente de la distancia de análisis (5, 10 o 15 m).

### 5.4.3. Análisis de la longitud del perfil

De manera adicional, se han analizado los 112 perfiles originales ( $Prof_i^{A_n}$  ( $i=1\dots4$ )) empleando su longitud inicial ( $L \approx 300 \text{ mm}$ ), calculando su JRC mediante la correlación propuesta por Li y Zhang (2015) (manteniendo, igualmente, una frecuencia de muestreo de  $2,5 \text{ mm}^{-1}$ ); con el objetivo de analizar el comportamiento de la formulación propuesta ( $JRC = 55.7376 \cdot Z_2 - 4.1166$ ) frente a perfiles con un longitud  $L > 100 \text{ mm}$ .

La Tabla 19 muestra los valores  $\overline{JRC}$  obtenidos (para cada Zona de Análisis y para todos los modelos y distancias de trabajo) para las distintas longitudes de perfil consideradas. Los resultados indican que salvo en el caso  $T_{A_4}^{15m}$  (1 caso de 28), los coeficientes  $\overline{JRC}$  calculados a partir de longitudes de perfil más largas ( $L \approx 300 \text{ mm}$ ) tienden a ser superiores a los calculados a partir de perfiles más cortos ( $L = 100 \text{ mm}$ ), con diferencias que oscilan entre +1 y +3 puntos en términos de JRC. Por lo tanto, estos resultados confirman que el uso de perfiles superiores al rango propuesto por Li y Zhang (2015) en su formulación ( $L \in [72 - 119,6 \text{ mm}]$ ) tienden a sobreestimar los valores JRC de la rugosidad.

Tabla 19. Valores medios  $\overline{JRC}$  calculados para todos los perfiles de las Zonas de Análisis estudiadas ( $A_1 - A_4$ ) en función de la longitud (entre paréntesis se indican las diferencias).

Zona de Análisis	Longitud del perfil [mm]	$\overline{JRC}$						
		$D_{A_n}$	$G_{A_n}^{5m}$	$T_{A_n}^{5m}$	$G_{A_n}^{10m}$	$T_{A_n}^{10m}$	$G_{A_n}^{15m}$	$T_{A_n}^{15m}$
$A_1$	100	12	8	11	7	9	6	8
	$\approx 300$	14 (+2)	9 (+1)	12 (+1)	8 (+1)	10 (+1)	7 (+1)	10 (+2)
$A_2$	100	13	7	12	6	10	6	9
	$\approx 300$	16 (+4)	10 (+3)	16 (+4)	8 (+2)	13 (+3)	8 (+2)	12 (+3)
$A_3$	100	12	10	12	8	11	7	10
	$\approx 300$	14 (+2)	11 (+1)	14 (+2)	10 (+2)	13 (+2)	9 (+2)	12 (+2)
$A_4$	100	5	4	5	4	4	4	5
	$\approx 300$	6 (+1)	5 (+1)	6 (+1)	5 (+1)	5 (+1)	5 (+1)	5 (0)

#### 5.4.4. Análisis del número de imágenes

Del mismo modo que en el Capítulo 3 (caracterización de discontinuidades en túneles a escala real), en esta sección se ha incluido un análisis del número mínimo de fotografías que se pueden emplear para la elaboración de modelos 3D (destinados al análisis de la rugosidad en campo) que conserven la calidad de los resultados presentados anteriormente.

Partiendo de los modelos originales de la Zona de Análisis  $A_3$  (denominados en lo que sigue como  $R_0$ ), se realizaron 4 tipos de sub-modelos ( $R_1, R_2, R_3$  y  $R_4$ ) reduciendo secuencialmente el número de imágenes y de posiciones en cada uno de ellos ( $R_0$ : 14/7;  $R_1$ : 10/5,  $R_2$ : 6/3,  $R_3$ : 3/3 y  $R_4$ : 2/2), para las 3 distancias de análisis (5-10-15 m) y tanto modelos general (G) como teleobjetivo (T). Para llevar a cabo esta reducción, se ha suprimido, en primer lugar, las posiciones más externas del “semicírculo” formado por las 7 ubicaciones donde se emplazaba la cámara para la generación de los primeros modelos ( $R_0$ ); disminuyendo progresivamente el ángulo del barrido fotogramétrico inicial ( $R_0 \approx 100^\circ$ ) hasta alcanzar un mínimo de  $\pm 45^\circ$  para los sub-modelos  $R_2, R_3$  y  $R_4$ , donde las imágenes seleccionadas para generar los modelos se obtienen únicamente desde 2 – 3 posiciones “centrales” sin apenas separación entre sí. En este sentido, se ha pretendido emular una de las situaciones más desfavorable para la técnica SfM, donde el grado de libertad de movimientos entorno al objeto de estudio se encuentra muy restringido y solamente es posible fotografiar la zona de análisis desde una única ubicación sin posibilidad de desplazamiento lateral.

Una vez generados los nuevos sub-modelos, se han extraído, para cada uno de ellos, los 3 sub-perfiles de  $L = 100 \text{ mm}$  pertenecientes a los 4 perfiles originales  $\bar{L} \approx 300 \text{ mm}$  ( $Prof_i^{A_3} (i=1...4)$ ). A continuación, se ha calculado el índice JRC de cada sub-perfil mediante la correlación con el parámetro  $Z_2$  y se han comparado los nuevos coeficientes con los resultados obtenidos anteriormente.

De este modo, la Figura 70 muestra la evolución del coeficiente JRC en los sub-perfiles del área de análisis  $A_3$  al disminuir el número de imágenes empleadas en la generación de los modelos fotogramétricos. Como se puede observar, al reducir el número de imágenes los coeficientes de rugosidad se mantienen prácticamente constantes, conservando los mismos valores JRC (con una variación media de  $\pm 2$  puntos) hasta aproximadamente el sub-modelo  $R_2$  (6 fotos). (Notar que, las mayores variaciones se producen en los modelos Generales a 10 y 15 m, mientras que en los modelos generados con Teleobjetivo (T) el valor de JRC permanece más constante). A partir de los sub-modelos  $R_2$ , la mayoría de los valores JRC proporcionados por los modelos generales (G) y teleobjetivo (T) aumentan bruscamente al disminuir el número de imágenes.

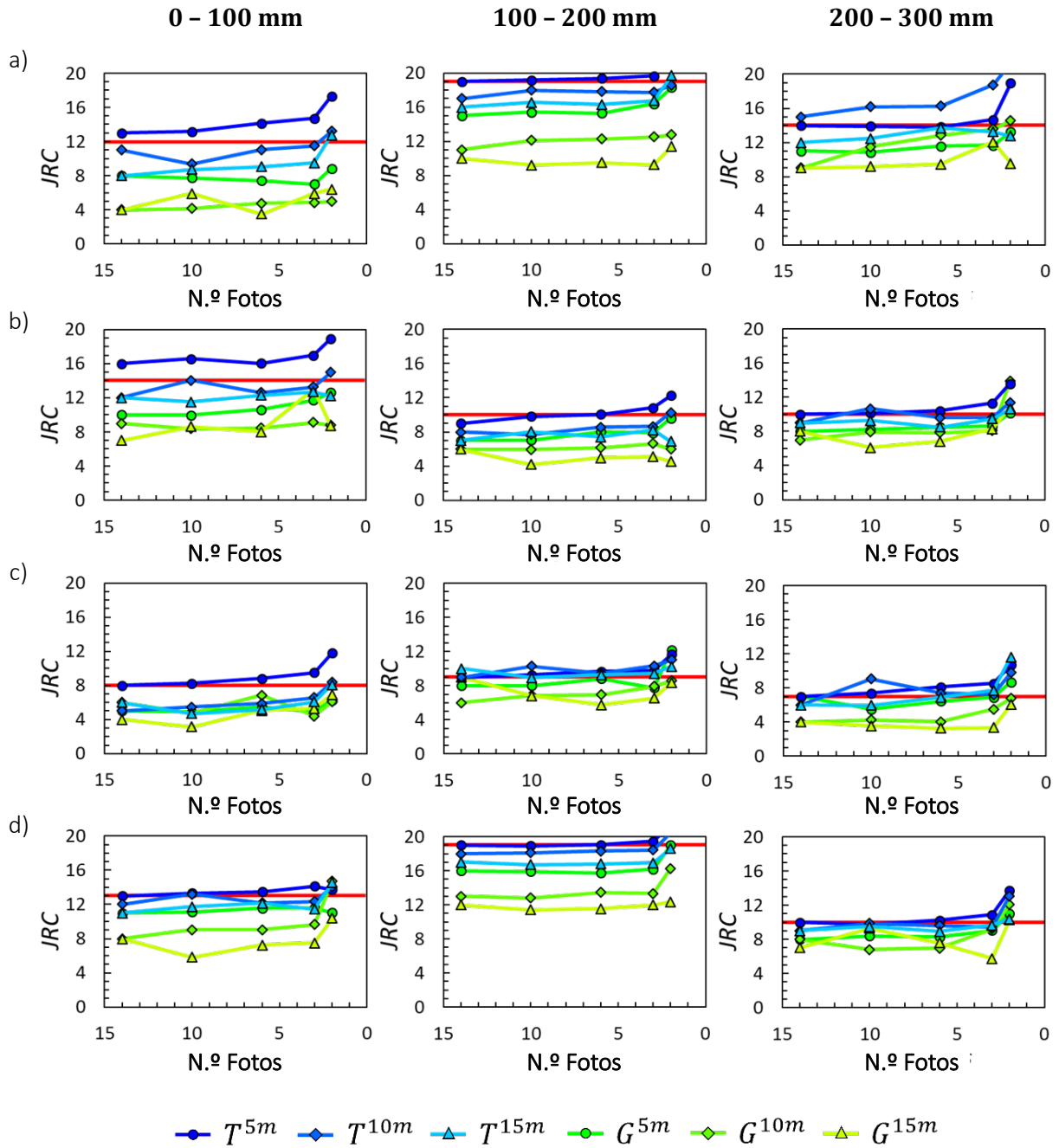


Figura 70. Evolución del coeficiente JRC en los sub-perfiles de la Zona de Análisis  $A_3$  al disminuir el número de imágenes empleadas en la generación de los modelos 3D: a)  $Prof_1^{A_3}$ ; b)  $Prof_2^{A_3}$ ; c)  $Prof_2^{A_3}$ ; d)  $Prof_2^{A_3}$ .

## Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia

El incremento en los coeficientes JRC, indicado en el párrafo anterior para los sub-modelos generados con menos de 6 fotos, sitúa los índices proporcionados por los modelos G más próximos a los “valores de referencia” proporcionados por los modelos de detalle (D). Sin embargo, este hecho es causado por un aumento del ruido de los modelos 3D. Al disminuir el número de imágenes por debajo de 6, la técnica SfM no es capaz de efectuar con precisión la reconstrucción 3D –al tener que trabajar con un número muy limitado de puntos comunes entre las imágenes–, aumentando la incertidumbre durante el proceso de restitución fotogramétrica y generando nubes de puntos con ruido (puntos aislados separados del resto de la nube). Este ruido, presente en los sub-modelos  $R_3$  y  $R_4$ , proporciona perfiles más abruptos y con mayores cambios de pendiente, que aumentan artificialmente los valores de  $Z_2$  y, por consiguiente, el de los coeficientes JRC.

Finalmente, la Tabla 20 muestra los tiempos de computación para la generación de los sub-modelos  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ . Como era de esperar, los tiempos de procesamiento disminuyen drásticamente al reducir el número de imágenes, situándose por debajo de los 5 *min* para todos los sub-modelos  $R_2$  (6 imágenes). Esta reducción no solamente supone menor tiempo de ordenador, sino que, al ser necesarias menos fotos, también permite disminuir el tiempo de la toma de datos en campo. (El tiempo total para realizar la campaña descrita en la Sección 5.3.3 fue de aproximadamente 6 horas; aunque este tiempo incluye tareas que no serían necesarias en una aplicación práctica, como la colocación de los GCPs Aislados o la toma de fotografías a diferentes distancias y con diferentes configuraciones de cámara. Se estima que una aplicación real, consistente en la instalación de la plantilla, ajuste de los parámetros de la cámara y toma de fotografías, podría durar 15 min para el estudio de un área de análisis).

Tabla 20. Tiempos de procesamiento para la generación de los nuevos sub-modelos ( $G$  y  $T$ ) realizados en la Zona de Análisis  $A_3$  reduciendo el número de imágenes (entre paréntesis se indica el número defotografías empleado en cada caso).

Sub-modelo	Nube de puntos	$G_{A_3}^{5m}$	$T_{A_3}^{5m}$	$G_{A_3}^{10m}$	$T_{A_3}^{10m}$	$G_{A_3}^{15m}$	$T_{A_3}^{15m}$
$R_1$ (10)	DPC	33 s	33 s	36 s	39 s	1 m 18 s	1 m 32 s
	HDPC	1 m 31 s	10 m 7 s	15 m 43 s	10 m 11 s	13 m 25 s	13 m 33 s
$R_1$ (6)	DPC	16 s	18 s	22 s	21 s	43 s	54 s
	HDPC	28 s	2 m 32 s	4 m 17 s	3 m 29 s	2 m 57 s	3 m 43 s
$R_1$ (3)	DPC	5 s	5 s	6 s	6 s	14 s	17 s
	HDPC	10 s	34 s	54 s	44 s	28 s	57 s
$R_1$ (2)	DPC	2 s	2 s	3 s	2 s	6 s	7 s
	HDPC	0 s	4 s	7 s	4 s	11 s	13 s



## 6. Conclusiones y líneas de investigación futuras

### 6.1. Conclusiones

En la presente tesis doctoral se han desarrollado diferentes metodologías de trabajo empleando la técnica fotogramétrica Structure from Motion para la resolución de problemas geotécnicos a diferentes escalas y con diferentes aplicaciones:

- Caracterización de discontinuidades en túneles a escala real, Capítulo 3
- Caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corta distancia, Capítulo 4
- Caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia, Capítulo 5

A continuación, se resumen las principales conclusiones obtenidas en cada una de las diferentes aplicaciones.

### **6.1.1. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de discontinuidades en túneles a escala real (Capítulo 3)**

En este Capítulo se presentó una metodología para la identificación de planos de discontinuidad en el frente de excavación de túneles reales en construcción. El primer paso de la metodología es la generación de una nube de puntos 3D a partir de las imágenes adquiridas en el frente, empleando un software especializado que emplee la técnica SfM (Agisoft Metashape), para, a continuación, analizar (y extraer) las discontinuidades empleando un software especializado DSE (Discontinuity Set Extractor). Los modelos generados fueron orientados y escalados con la ayuda de la Plantilla 2.0 desarrollada para el presente estudio, gracias a la cual, ha sido posible comparar las medidas realizadas en el modelo 3D (orientado “in situ”) con las medidas manuales efectuadas directamente sobre el macizo. Este trabajo ha demostrado que las condiciones de iluminación necesarias para una aplicación exitosa de la técnica SfM pueden obtenerse fácilmente con la ayuda de equipos de construcción subterráneos típicos, como los jumbos de perforación. Asimismo, también es posible emplear iluminación adicional (portátil) situada directamente sobre la cámara o en las proximidades del frente de excavación. La metodología propuesta fue aplicada a dos túneles reales, en construcción, situados en el norte de España. Los resultados obtenidos con el enfoque SfM + DSE se compararon con los resultados de un análisis DIPS tradicional basado en mediciones manuales efectuadas con brújula. Ambas técnicas identifican el mismo número de familias de discontinuidad con orientaciones similares: las diferencias en la orientación tienden a ser menores a  $10^\circ$  para planos no horizontales, estando dentro del rango de variabilidad de medición (incertidumbre) asociado a la medición de orientaciones usando una brújula (Robertson 1970; Windsor y Robertson 1994). Solo un conjunto sub-horizontal presentó mayores diferencias de orientación con respecto a los resultados manuales; esto se debe en parte a las dificultades para caracterizar las orientaciones cuando son paralelas a la visual de la cámara (Riquelme 2015), pero argumentamos que, en este caso, tales dificultades se incrementan en gran medida por el hormigón proyectado que se acumuló en ellas. Finalmente, los análisis del número mínimo de fotografías que se necesitan para obtener una caracterización adecuada de frente del túnel demuestran que se necesitan alrededor de unas 15 fotografías de buena calidad para túneles con áreas excavadas de aproximadamente  $50 \text{ m}^2$ ; y también ilustran que la calidad de los resultados está directamente relacionada con la calidad del modelo fotogramétrico inicial, para lo cual la resolución de las imágenes y su grado de superposición desempeñan un papel crucial, siendo incluso más importante que el número de fotografías empleadas.

### **6.1.2. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a corta distancia (Capítulo 4)**

En este Capítulo se presentó una novedosa metodología para la caracterización de la rugosidad en muestras de laboratorio a partir de la correcta parametrización sus espectros de frecuencia. El enfoque comienza con la generación de varias nubes de puntos 3D de alta densidad utilizando la técnica SfM. Para ello, se ha desarrollado un entorno controlado, con una iluminación constante, que permite la adquisición de imágenes de alta calidad empleando una cámara digital convencional. Además, para facilitar la captura de las fotografías y minimizar el número de operaciones (y movimientos) entre cada par de imágenes, se ha desarrollado un set de fotografía (macro) que incluye una plataforma giratoria que permite realizar “de forma rápida y sencilla” varios barridos de 360° alrededor de las muestras. De este modo, se elimina la necesidad de desplazarse alrededor de las muestras, evitando posibles errores asociados al movimiento del sensor. Una vez generados los modelos 3D, se utilizó un software específico (MATLAB) para la extracción de los perfiles de las superficies analizadas a partir de las coordenadas relativas proporcionadas gracias a la incorporación de la Plantilla de Orientación 3.0 en el entorno de las muestras. A continuación, estos perfiles fueron caracterizados empleando dos enfoques diferentes: uno estadístico, a partir de correlaciones que relacionan el coeficiente de rugosidad JRC con el parámetro  $Z_2$  y uno espectral. Para este último, se emplearon los espectros de frecuencia de los perfiles generados estableciendo un umbral entre las frecuencias bajas y altas (es decir, entre la ondulación y la rugosidad de segundo orden). Esto permitió probar varios enfoques para representar las relaciones espectrales amplitud–frecuencia, con el objetivo de obtener los parámetros de ajuste que mejor se adaptan a cada uno de los casos planteados. Por último, se desarrolló un clasificador capaz de estimar el coeficiente JRC de las muestras empleando únicamente los parámetros de ajuste presentados; validado a través de la comparación con los valores JRC estimados a partir de las correlaciones. Los resultados sugieren que los valores de JRC estimados utilizando la información espectral tienden a ser bastante similares (con errores menores o iguales a  $\pm 2$  JRC en aproximadamente el 80% de los casos) a los estimados utilizando  $Z_2$ , superior a las estimaciones obtenidas a partir de métodos visuales.

### **6.1.3. Aplicación de la técnica SfM para la caracterización de la rugosidad en macizos rocosos a larga distancia (Capítulo 5)**

Por último, en este Capítulo se presentó la última metodología desarrollada en la presente tesis doctoral: el uso de la técnica SfM en combinación con teleobjetivos para el análisis de la rugosidad superficial en taludes rocosos a larga distancia. Esta metodología fue aplicada con éxito en un talud rocoso de composición calcárea situado en el norte de España, donde se analizaron 4 áreas con diferentes niveles de rugosidad. En este capítulo se incorpora la novedad del uso de teleobjetivos para la adquisición de las imágenes que serán utilizadas para alimentar los modelos 3D generados a partir de la técnica SfM. De este modo, se analizó la posibilidad de aumentar la distancia de trabajo respecto al objeto de estudio, sin reducir la calidad de los resultados y el grado de detalle de las nubes de puntos de alta densidad. Para ello, se efectuaron varios modelos 3D generados a diferentes distancias del talud (5, 10 y 15 m) variando la distancia focal empleada para la adquisición de las imágenes ( $f = 55 - 200$  mm). Las diferentes nubes de puntos de alta densidad generadas fueron comparadas entre sí a través de la rugosidad media y el coeficiente JRC –calculado a partir de la correlación con el parámetro estadístico  $Z_2$ – obtenido a partir del análisis de varios perfiles extraídos de las diferentes áreas del talud. Asimismo, se efectuaron varios modelos de detalle realizados a partir de imágenes obtenidas a corta distancia, que serán utilizados como modelos de referencia a la hora de iniciar las comparaciones. Estos modelos fueron escalados y orientados independientemente gracias a la ayuda de la Plantilla de Orientación 4.0 incorporada en cada una de las áreas de estudio. Los resultados muestran que el aumento de la distancia focal en los modelos generados con teleobjetivo ( $f=200$  mm) contribuye a la generación de nubes de puntos 3D más precisas que se adaptan mejor a los modelos de referencia. A su vez, los perfiles extraídos de estos modelos proporcionan valores JRC más próximos a los valores de referencia que los calculados a partir de los modelos con objetivos generales ( $f=55$ ). Además, mediante el análisis de perfiles de rugosidad de 300 mm, se concluye que el uso de perfiles con longitudes superiores a las indicadas por Li y Zhang (2015) ( $L \in [72 - 119.6 \text{ mm}]$ ) aumenta las posibilidades de sobrestimar los valores JRC. Por último, los resultados indican que es posible generar modelos 3D para la caracterización de la rugosidad a partir de un mínimo de 6 fotografías, con un error aceptable en términos de JRC ( $\pm 2$  puntos). Esto conlleva tiempos de computación muy breves ( $< 5$  min) además de reducir el tiempo de la toma de datos en campo.

## 6.2. Líneas de investigación futuras

Una vez finalizadas las investigaciones desarrolladas en la presente tesis doctoral, se observaron varios aspectos de mejora y posibles aplicaciones adicionales que podrían resultar interesantes para ser desarrolladas como investigaciones futuras. A continuación, se sugieren varias propuestas para la continuación de esta tesis doctoral:

- En el Capítulo 4 se demostró la capacidad de la metodología para diferenciar entre distintos niveles de rugosidad, por lo tanto, este hecho también abre la posibilidad de caracterizar el comportamiento a cortante de las juntas considerando su ondulación y rugosidad de segundo orden de forma independiente.
- Asimismo, dada la gran cantidad de perfiles obtenidos (y analizados) en el Capítulo 5, también se abre la posibilidad de incorporar estos resultados dentro del análisis realizado en el Capítulo 4, estudiando (de nuevo) la rugosidad de los modelos efectuados en el talud a partir de su espectros de frecuencias.
- Por último, gracias al gran desarrollo que ha experimentado en los últimos años el uso y la comercialización de los drones, se ha abierto la posibilidad de introducir este tipo de plataformas en los estudios realizados con la técnica SfM; permitiendo la incorporación del componente aéreo (gran escala) en las nuevas investigaciones.



## Referencias

- Alameda-Hernández, P., El Hamdouni, R., Irigaray, C., y Chacón, J. (2019) Weak foliated rock slope stability analysis with ultra-closerange terrestrial digital photogrammetry. *B. Eng. Geol. Environ.*, 78(2), 1157-1171. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1119-z>
- Balaguer Puig, M. (2015) Análisis empírico de soluciones fotogramétricas en estudios de erosión hídrica en laboratorio (Tesis Doctoral), Universitat Politècnica de València, Valencia.
- Barton, N.R. (1973) Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287-332.
- Barton, N.R., Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1), 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Beer, A.J., Stead, D., Coggan, J.S. (2002) Estimation of the Joint Roughness Coefficient (JRC) by visual comparison. *Rock Mech. Rock Eng.*, 35(1), 65-74. <https://doi.org/10.1007/s006030200009>
- Bonneval, H. (1972) *Photogrammétrie générale*. París: s.n.
- Buyer, A., Schubert, W. (2016) Extraction of discontinuity orientations in point clouds. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future, International Symposium on International Society for Rock Mechanics, ISRM 2016, Cappadocia, Turkey*, 2, 1133-1138.
- Buyer, A., Schubert, W. (2017) Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds. In: *Procedia engineering, ISRM European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2017, Ostrava, Czech Republic*, 191, 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.181>
- Chae, B.G., Choi, J.H., Ichikaea, Y., y Seo, Y.S. (2011). Analysis of the permeability characteristics along roughwalled fractures using a homogenization method. *Nuclear Engineering and Technology*, 44(1), 43-52.
- Chaiyasarn, K., Kim, T., Viola, F., Cipolla, R., y Soga, K. (2015) Distortion-free image mosaicing for tunnel inspection based on robust cylindrical surface estimation through structure from motion. *J. Comput. Civ. Eng.*, 30(3). [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000516](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000516)
- Dandois, J.P., Ellis, E.C. (2010) Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*, 2(4), 1157-1176. <http://doi.org/10.3390/rs2041157>
- Drews, T., Miernik, G., Anders, K., Höfle, B., Profe, J., Emmerich, A., y Bechstädt, T. (2018) Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detections. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 109, 19-31. <https://doi.org/10.1016/mms.2018.06.023>

- Dowling, T., Read, A., Gallant, J. (2009) Very high-resolution DEM acquisition at low cost using a digital camera and free software. In: International Congress on Modelling and Simulation, 18th World IMACS Congress and MODSIM09, Cairns, Australia, 2479-2485.
- Fekete, S., Diederichs, M., Lato, M. (2010) Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels. *Tunnel Underground Space Technol.*, 25(5), 614-628. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.04.008>.
- Fernández, T., Pérez, J.L., López, A., Gómez, J.M., Cardenal, J., y Delgado, J. (2014) Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos UAV e históricos.
- FSB, 2017. Fundación Santa Bárbara. <https://www.fsbarbara.com>.
- García-Luna, R. (2016) Obtención de características del macizo rocoso mediante fotogrametría digital. Trabajo Fin de Máster, CEDEX.
- Galve, J.P., Notti, D., Pérez-García, J.L., y Fernández-Chacón, F. (2015) Análisis multi-escala combinando diferentes técnicas remotas para identificar deslizamientos que afectan a carreteras de la Alpujarra (Granada). *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos*, XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Ge, Y., Kulatilake, P.H., Tang, H., y Xiong, C. (2014) Investigation of natural rock joint roughness. *Computers and Geotechnics*, 55, 290-305.
- Gigli, G., Casagli, N. (2011) Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48(2), 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.009>
- Girardeau-Montaut, D. (2016) Cloud Compare: 3D point cloud and mesh processing software, open-source project. On-line: <http://www.danielgm.net>. Version 2.6.
- González Menéndez, L., Heredia, N., Marcos, A. (2008) Mapa Geológico Digital Continuo E. 1: 50.000, Zona Asturoccidental-Leonesa (Zona-1100). in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España [en línea] [16/12/2019]. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1100>
- Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., y Witten, I.H. (2009) The WEKA Data Mining Software: An Update. *SIGKDD Explorations*, 11(1).
- Hammett, R., Hoek, E. (1981) Design of large underground caverns for hydroelectric projects with particular reference to structurally controlled failure mechanisms. In: Session on Rock Mechanics of Large Hydro Projects, ASCE Spring Convention, New York.
- Haneberg, W.C. (2007) Directional roughness profiles from threedimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T (eds) *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, 1, 101-106. [https://doi.org/10.1201/noe0415444\\_019-c13](https://doi.org/10.1201/noe0415444_019-c13)
- Health and Safety Executive (1996) *Safety of New Australian Tunnelling Method (NATM) Tunnels. A review of sprayed concrete tunnels with particular reference to London clay.* (HSE) Books, Sudbury.
- Hsiung, S.M., Ghosh, A., Ahola, M.P., y Chowdhury, A.H. (1993) Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 30(7), 825-829. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90030H](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90030H)

## Referencias

- ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1978) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.*, 15, 319-368.
- Jimenez-Rodriguez, R., Sitar, N. (2006a) A spectral method for clustering of rock discontinuity sets. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43(7), 1052-1061. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.02.003>
- Jimenez-Rodriguez, R., Sitar, N. (2006b) Inference of discontinuity trace length distributions using statistical graphical models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43(6), 877-893. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.12.008>
- Karzulovic, A.L. (1988) The use of Keyblock Theory in the Design of Linings and Supports for Tunnels (PhD Thesis), University of California, Berkeley.
- Li, Y., Huang, R. (2015) Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 75, 15-22.
- Li, Y., Zhang, Y. (2015) Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameter. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 77, 27-35.
- Lorenzo, A., Iseburg, M., Arbelo, M., y Alonso-Benito, A. (2012) Comparación de modelos digitales del terreno obtenidos mediante LiDAR y técnicas fotogramétricas en una zona forestal de la isla de Tenerife. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.
- Maerz, N., Franklin, J., Bennett, C. (1990) Joint roughness measurement using shadow profilometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 27(5), 329-343. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)92708-M](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)92708-M)
- Marzahn, P., Rieke-Zapp, D., Ludwig, R. (2012) Assessment of soil surface roughness statistics for microwave remote sensing applications using a simple photogrammetric acquisition system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 72, 80-89.
- Merino-Tomé, O., Suárez Rodríguez, A., Alonso Alonso, J.L. (2011) Mapa Geológico Digital continuo E. 1: 50.000, Zona Cantábrica (Zona-1000). in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España [en línea] [16/12/2017]. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1000>
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N. (2015) Structure from motion (SfM) photogrammetry. In: Clarke, L.E. and Nield, J.M. (Eds.), *Geomorphological Techniques (Online Edition)*. British Society for Geomorphology, London, Chap. 2, Sec. 2.2. <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/17493>
- Palmström, A. (2001) Measurement and characterization of rock mass jointing. Chapter 2 of the book: *In-Situ Characterization of Rocks*, A.A. Balkema Publishers.
- Patton, F.D. (1966) Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Int. Congress on rock Mechanics*, Lisbon, 1, 509-513.
- Prandoni, P., Vetterli, M. (2008) *Signal processing for communications*, EPFL Press.
- Russell, T.S. (2016) *Calculating the Uncertainty of a Structure from Motion (SfM) Model*, Cadman Quarry, Monroe, Washington.
- Riquelme, A.J. (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 (Tesis Doctoral)*, Universidad de Alicante, Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/51107>

- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., y Jaboyedoff, M. (2014) A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers and Geotechnics*, 68, 38-52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014>
- Robertson, A. (1970) The interpretation of geological factors for use in slope theory. Johannesburg, South Africa, 55-71.
- Rocscience, Inc. (2017) Dips User Manual. Version 7.0.
- Roncella, R., Umili, G., Forlani, G. (2012) A novel image acquisition and processing procedure for fast tunnel DSM production. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 297-302. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-297-2012>
- Shi, G., Goodman, R.E. (1989) The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 13(2), 131-158. <https://doi.org/10.1002/nag.1610130203>
- Shirono, T., Kulatilake, P.H.S.W. (1997) Accuracy of the spectral method in estimating fractal/spectral parameters for self-affine roughness profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(5), 789-804.
- Slama, C.C., Theurer, C., Henriksen, S.W. (1980) *Manual of Photogrammetry*. American Society of photogrammetry, Falls Church, Va., United States.
- Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. (2008) Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Stigsson, M., Ivars, D.M. (2019) A novel conceptual approach to objectively determine JRC using fractal dimension and asperity distribution of mapped fracture traces. *Rock Mech. Rock Eng.*, 52(4), 1041-1054. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1651-6>
- Sturzenegger, M. (2010) Multi-scale characterization of rock mass discontinuities and rock slope geometry using terrestrial remote sensing techniques (PhD Thesis), Simon Fraser University, Canada.
- Sturzenegger, M., Stead, D. (2009) Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 106(3-4), 163-182. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004>
- Sturzenegger, M., Stead, D., Beveridge, A., y Lee, S. (2009) Long-range terrestrial digital photogrammetry for discontinuity characterization at Palabora open-pit mine. In: Diederichs M, Grasselli G (eds) *ROCKEN09: proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada 1–10.
- Tatone, B. S., Grasselli, G. (2013) An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high-resolution surface measurements. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46(4), 657-681.
- Terzaghi, R.D. (1965) Sources of error in joint surveys. *Geotechnique* 15(3), 287–304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>
- The MathWorks, Inc. (2019) *MATLAB (MATrix LABoratory)*, Version 9.6 (R2019a).
- Tse, R., Cruden, D.M. (1979) Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 16(5) 303-307.

## Referencias

- Unal, M., Unver, B. (2004) Characterization of rock joint surface degradation under Shear Loads. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(3).
- Van Knapen, B., Slob, S. (2006) Identification and characterisation of rock mass discontinuity sets using 3D laser scanning. In: *Engineering Geology for Tomorrow's Cities: Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, IAEG2006 Paper*, 438.
- Verma, A.K., Bourke, M.C. (2019) A method based on structure-from motion photogrammetry to generate sub-millimetre-resolution digital elevation models for investigating rock breakdown features. *Earth. Surf. Dyn.*, 7, 45–66. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-45-2019>
- Wang, S., Ni, P., Guo, M. (2013) Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks. *Tunnel Underground Space Technol.*, 38, 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.017>
- Wernecke, C., Marsch, K. (2015) Mapping rock surface roughness with photogrammetry. In *ISRM Regional Symposium-EUROCK 2015. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., y Reynolds, J. (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Windsor, C., Robertson, W. (1994) *Rock reinforcement practice, Rock Mass Formulation*, 1.
- Wolter, A., Stead, D., Clague, J.J. (2014) A morphologic characterisation of the 1963 Vajont Slide, Italy, using long-range terrestrial photogrammetry. *Geomorphology*, 206, 147-164. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.006>
- Yang, Z.Y., Di, C.C., Yen, K.C. (2001) The effect of asperity order on the roughness of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38(5), 745-75.
- Yu, X., Vayssade, B. (1991) Joint profiles and their roughness parameters. *Int., J., Rock Mech., Min., Sci., Geomech., Abstr.*, 28(4), 333-336.
- Zhu, H., Wu, W., Chen, J., Ma, G., Liu, X., y Zhuang, X. (2016) Integration of three-dimensional discontinuous deformation analysis (DDA) with binocular photogrammetry for stability analysis of tunnels in blocky rockmass. *Tunnel Underground Space Technol.*, 51, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.10.012>
- Zou, L., Jing, L., Cvetkovic, V. (2015) Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 75, 102-18.