

**Relevamiento topográfico de alta resolución: comparación de modelos del terreno
mediante Estación Total y fotogrametría SfM-MVS. Aplicación en una cantera de
suelos seleccionados, La Plata, Buenos Aires**

Nicolás GUARDO^{1*}, Luciano LÓPEZ²⁻³ y Andrés BILMES²⁻⁴

¹Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

³Instituto de Recursos Minerales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, BA, Argentina.

⁴Instituto Patagónico de Geología y Paleontología, Puerto Madryn, Chubut, Argentina

Email: nicolasguardo24@gmail.com

Editor: Diego A. Kietzmann

Recibido: 14 de noviembre de 2020

Aceptado: 26 de enero de 2021

Disponible online: 26 de enero de 2021

RESUMEN

Se realizó el relevamiento topográfico de una cantera de suelos seleccionados ubicada en el Partido de La Plata mediante dos técnicas de relevamiento de campo. Un relevamiento fue realizado usando estación total y otro utilizando la técnica fotogramétrica

Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) con plataforma aérea, siendo el resultado final de cada una un modelo digital del terreno. Ambas metodologías se emplearon con el fin de poder compararlas entre sí, analizar el alcance y las limitaciones, como también la precisión en el cálculo de volumen para la cubicación del material extraído. Se compararon los resultados entre ambas técnicas a partir de un *DEM of Difference* y el cálculo de volumen de material extraído. El relevamiento con SfM-MVS fue validado a partir de puntos de control independientes obtenidos con GPS diferencial y el error absoluto del modelo es de 9.26 centímetros. El modelo generado con Estación Total muestra que las mayores diferencias se deben a zonas sin datos donde se realizó la interpolación de curvas de nivel. El modelo generado por SfM-MVS concentra los mayores errores en las regiones con pendientes mayores a 30° y con vegetación densa. Los volúmenes obtenidos con ambos métodos indican diferencias menores al 10 %. La técnica SfM-MVS constituye una herramienta rápida, de bajo costo y efectiva para el relevamiento de canteras ya que la alta densidad de puntos y el registro sistemático de los mismos producen representaciones más completas y realistas de las zonas relevadas, en comparación con técnicas tradicionales como la Estación Total.

Palabras clave: Topografía, VANT, *structure from motion*, modelo digital del terreno, *DEM of difference*

ABSTRACT

High resolution topographic survey: comparison of terrain models using Total Station and SfM-MVS photogrammetry. Application in a quarry of selected soils, La Plata, Buenos Aires.

The topographic survey of a selected soil quarry located in the Partido de La Plata was carried out, using two field survey techniques. One survey was carried out using a Total Station and another using the Structure from Motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) photogrammetric technique with an aerial platform, obtaining as the final result of each one a

digital terrain model. Both methodologies were used in order to be able to compare them with each other, analyzing the scope and limitations, as well as the precision in the volume calculation of the extracted material. The results between both techniques were compared generating a DEM of Difference and calculating the volume of extracted material. The SfM-MVS survey was validated using independent control points obtained with differential GPS and the absolute error of the model is 9.26 centimeters. The model generated with Total Station shows that the greatest differences are due to areas with no data where contour interpolation was performed. The model generated by SfM-MVS concentrates the greatest errors in the regions with slopes greater than 30° and with dense vegetation. The volumes obtained with both methods indicate differences of less than 10 %. The SfM-MVS technique constitutes a fast, low-cost and effective tool for the survey of quarries due to the high density of points and their systematic registration produce more complete and realistic representations of the surveyed areas, compared to traditional techniques such as Total Station.

Keywords: Topography, UAV, structure from motion, digital terrain model, dem of difference

1 INTRODUCCIÓN

2

3 La generación de modelos topográficos de alta resolución espacial reviste gran
4 interés y aplicación dentro del campo de las geociencias (Fonstad et al. 2013, Carrivick et al.
5 2016). Tradicionalmente, el enfoque se basa en obtener una representación lo más
6 completa y precisa posible de la superficie, a partir de puntos con coordenadas espaciales
7 que tengan relevancia topográfica, y con estos realizar interpolaciones manuales o
8 semiautomáticas en combinación con imágenes satelitales o fotos aéreas.

9 En la actualidad existe una amplia variedad de técnicas y metodologías que permiten
10 llevar a cabo mediciones de puntos sobre el terreno con precisión y resolución submétrica.
11 Las técnicas más comunes y accesibles empleadas en relevamientos topográficos son la
12 estación total (ET) y el GPS diferencial (GPSd). Si bien con estas técnicas se obtiene una
13 precisión subdecimétrica, la generación de modelos de alta resolución espacial (con alta
14 densidad de puntos), requiere una importante inversión de tiempo, *hardware* y *software*
15 (Fonstad et al. 2013). Además, ciertas características del terreno, tales como la presencia de
16 pendientes pronunciadas, o una pobre cobertura satelital pueden llevar a que los
17 relevamientos que utilizan estos instrumentos se vuelvan dificultosos (Westoby et al. 2012).

18 Actualmente, el relevamiento espacial de datos de campo se encuentra en una etapa
19 de “revolución” en términos tecnológicos. El desarrollo de computadoras con alto poder de
20 procesamiento, vehículos aéreos no tripulados y nuevas técnicas fotogramétricas, tales
21 como *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS), hacen posible que las
22 representaciones de la superficie terrestre puedan realizarse con alta resolución espacial, de
23 una manera rápida y económica. Sin embargo, estudios comparativos entre técnicas de ET
24 o GPSd con técnicas aeroterrestres de fotogrametría SfM-MVS muestran resultados muy
25 variables en función de las características del terreno y la estrategia de adquisición de datos,
26 georreferenciación y validación de los modelos generados (Tonkin et al. 2014, Sanz-
27 Ablanedo et al. 2018, D’Elia et al. 2021). El conocimiento acerca del alcance y las
28 limitaciones de relevamientos topográficos utilizando la técnica fotogramétrica SfM-MVS

29 cobra relevancia, en especial en tareas que necesiten de la comparación temporal de
30 variaciones en el relieve, como son explotaciones a cielo abierto de los recursos naturales.

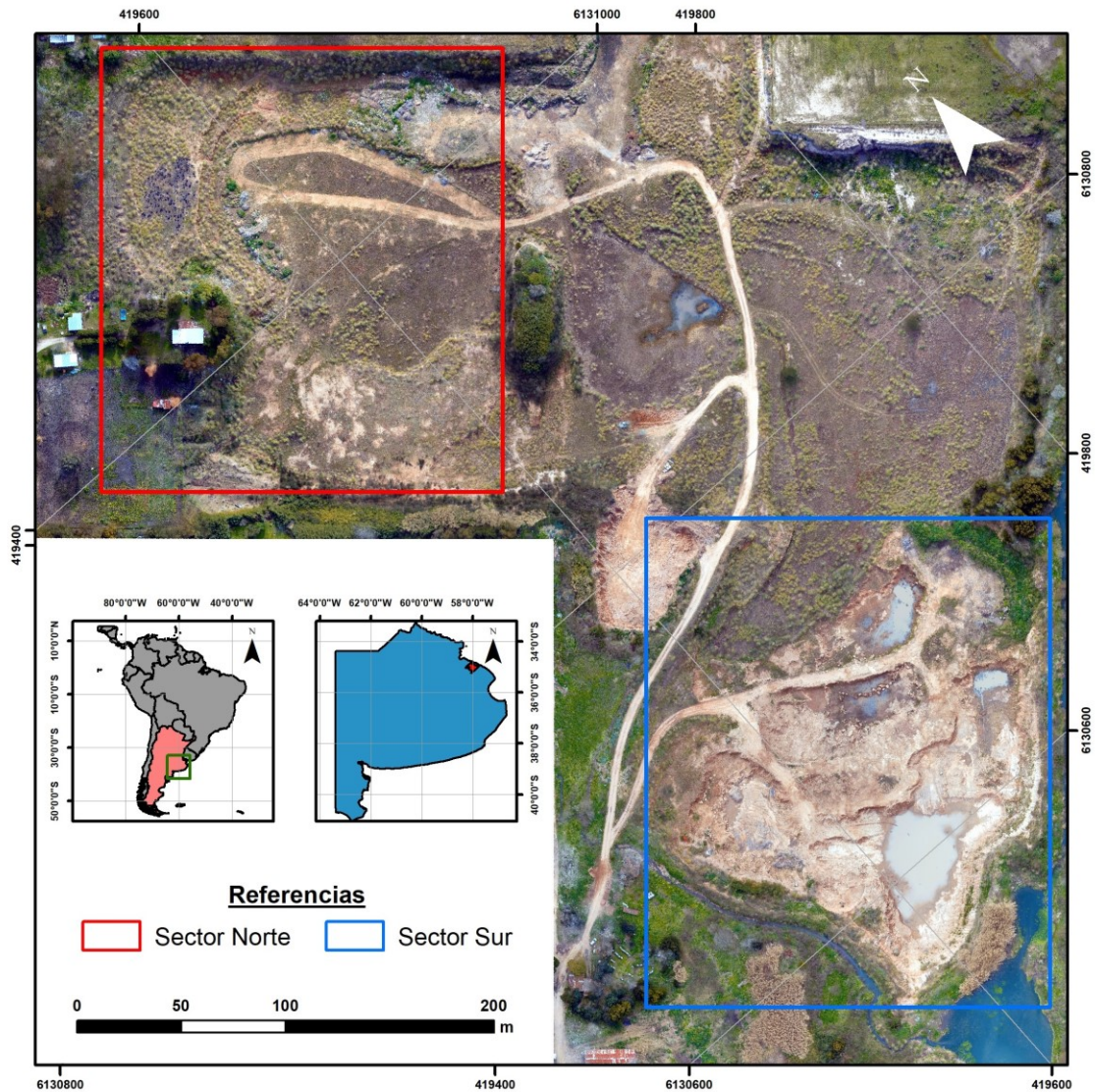
31 El objetivo del presente trabajo consiste en comparar el relevamiento topográfico de
32 una cantera de suelos utilizando la técnica tradicional con ET y el relevamiento empleando
33 la técnica fotogramétrica SfM-MVS aérea. Asimismo, se analizan los alcances y limitaciones
34 de ambas técnicas y se realiza un cálculo de volúmenes de material extraído de la cantera.

35

36 **MARCO GEOLÓGICO**

37

38 La cantera Alonso-Di Ianni se encuentra ubicada en el Barrio Aeropuerto del Partido
39 de La Plata y es explotada para la extracción de suelos seleccionados, empleados
40 principalmente para el relleno de caminos y obras civiles. La cantera ocupa una superficie
41 aproximada de 18 ha y presenta dos sectores con características contrastantes, el sector
42 norte y el sector sur (Fig. 1). El primero de ellos constituye una zona que se encuentra sin
43 explotar en la actualidad, donde la explotación se detuvo hace 10 años, y que presenta
44 abundante vegetación. El sector sur es actualmente una zona de explotación activa que se
45 caracteriza por la escasa o nula presencia de vegetación.



46

47 **Figura 1.** Ubicación de la cantera Alonso-Di Ianni y detalle de los sectores norte y sur.

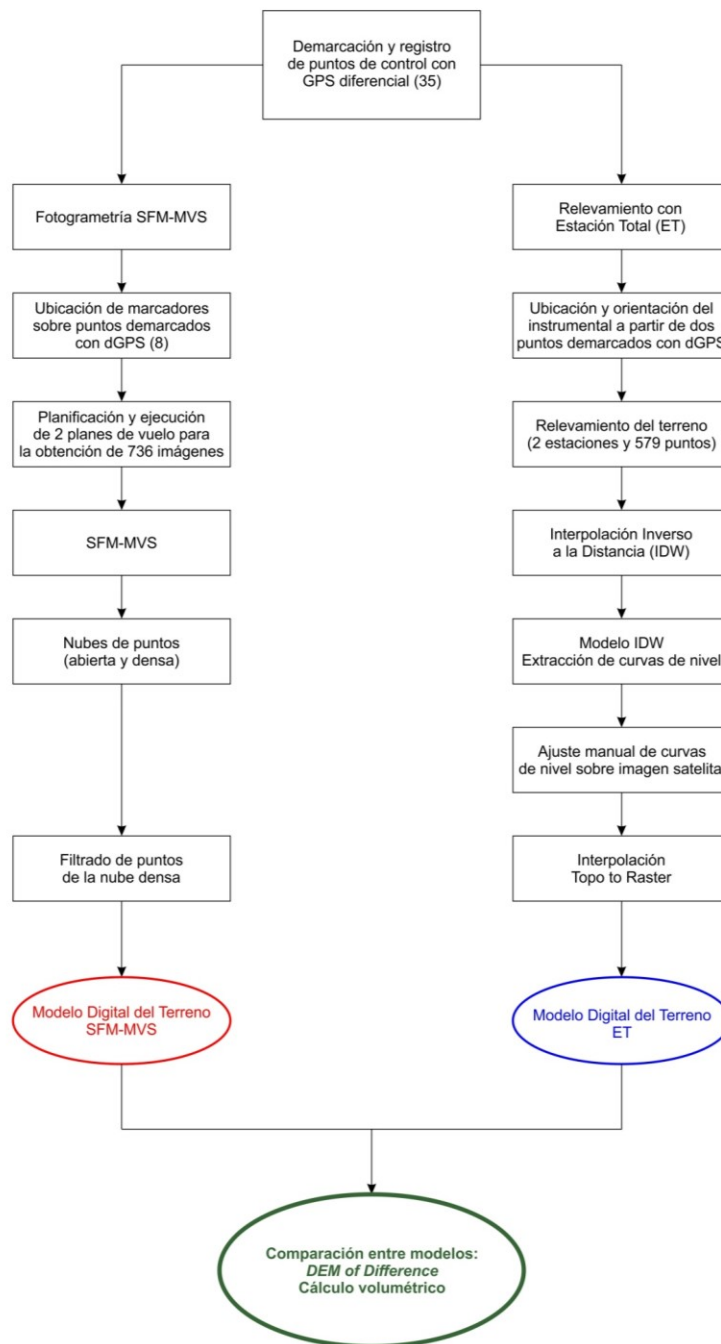
48

49 **METODOLOGÍA**

50

51 Las metodologías de trabajo utilizadas para la adquisición de datos topográficos
 52 mediante ET y SfM-MVS aéreo (Fig. 2), tuvieron un procedimiento inicial compartido que
 53 consistió en la demarcación y registro de puntos de control de campo (PC). Los PC fueron
 54 ubicados y distribuidos de manera estratégica a lo largo de toda la superficie y demarcados
 55 mediante estacas para su fácil reconocimiento. Para la obtención de las coordenadas
 56 espaciales de estos puntos se utilizó un GPSd modelo Trimble® R2, en modo *Real Time*
 57 *Extended* (RTX; exactitud horizontal ± 2 cm y exactitud vertical ± 5 cm), integrado por un

58 receptor y colector sustentados por un bastón rígido (Fig. 3a). En total fueron levantados 35
59 puntos de control, con sistema de coordenadas proyectadas UTM Zona 21S, con datum
60 horizontal WGS 1984 y datum vertical EGM2008.



61
62 **Figura 2.** Flujos de trabajo empleados en los relevamientos con fotogrametría *Structure from Motion-Multi View*
63 *Stereo* y estación total.

64 Las técnicas de relevamiento topográfico empleadas utilizaron como base este
65 armazón de puntos de control. A continuación, se describen los flujos de trabajo de ambas
66 técnicas.

67

68 **Relevamiento con estación total**

69 El relevamiento con ET se realizó de forma independiente en el sector norte y en el
70 sector sur. El instrumental utilizado consistió en una estación total Kolda® 442, con una
71 precisión de $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ (Fig. 3b).

72 Cada uno de los sectores se relevó mediante radiación a partir de una única
73 estación, la cual fue posicionada y orientada utilizando las coordenadas de dos puntos
74 obtenidos con GPSd. En el sector norte se levantaron en total 194 puntos, mientras que
75 para el sector sur fueron registrados 385 puntos (Fig. 4).

76 El procesamiento de los puntos adquiridos con ET fue realizado a través del sistema
77 de información geográfica *ArcGIS* 10.0, bajo licencia académica. Para la interpolación, se
78 utilizó el método Inverso a la Distancia al Cuadrado (*Inverse Distance Weighting*, IDW), con
79 el cual se generó un modelo de elevación digital del terreno (ráster) y, posteriormente, se
80 extrajeron las curvas de nivel.

81 Con la finalidad de representar adecuadamente el relieve de la zona de estudio, se
82 procedió a realizar una corrección manual de las curvas de nivel generadas por interpolación
83 en las zonas donde se evidenciaba que las curvas no representaban ajustadamente la
84 topografía. Para ello, se utilizó una imagen satelital actualizada de *Google Earth* como
85 referencia, sumado a los datos de altura de los puntos relevados en campo. Finalmente, se
86 generó un modelo de elevación del terreno, a partir de la transformación de las mismas de
87 formato vectorial a formato ráster (herramienta de interpolación *Topo to Raster*).

88

89 **Fotogrametría Structure from Motion-Multi View Stereo**

90 La técnica *Structure from Motion-Multi View Stereo* (SfM-MVS) constituye un método
91 de relevamiento fotogramétrico de bajo costo, desarrollado a partir de la década de 1980 y

92 utilizado para reconstrucciones topográficas de alta precisión y resolución espacial (Westoby
93 et al. 2012). La misma opera bajo los mismos principios que la fotogrametría analógica, en la
94 cual la reconstrucción de la geometría tridimensional de la superficie se resuelve mediante la
95 superposición de imágenes desplazadas, es decir, a partir de pares estereoscópicos.

96 La principal diferencia entre dicha técnica y la fotogrametría tradicional radica en que,
97 para esta metodología, no resulta necesario especificar la posición espacial (X, Y, Z) de la
98 cámara al momento de la toma de las imágenes como tampoco los parámetros y
99 características intrínsecas y extrínsecas de la misma (Westoby et al. 2012). Si bien se
100 definen algunos conceptos generales acerca de la presente técnica, se detallará el flujo de
101 trabajo de la misma como parte de la metodología de trabajo, sugiriéndose los trabajos de
102 Snavely et al. (2006, 2008) y Carrivick et al. (2016) para una revisión más exhaustiva.

103

104 **Ubicación de marcadores y adquisición de imágenes.** Previo al relevamiento aéreo, se
105 colocaron marcadores sobre ocho de los puntos demarcados previamente con GPSd, de
106 manera de poder identificarlos en las imágenes y utilizarlos como base para la
107 georreferenciación y escalado del modelo (Fig. 4). Los marcadores consisten en
108 impresiones en hojas A4 de marcadores estandarizados generados por el *Agisoft*
109 *Metashape Professional* (Fig. 3d). A su vez, debido a que la cantera se encuentra en
110 cercanías al aeropuerto de la ciudad, y según la normativa vigente, se solicitó autorización a
111 la torre de control del mismo para poder llevar a cabo la operación.

112 Las fotografías fueron tomadas en un único día de trabajo, a partir de la ejecución de
113 dos planes de vuelo con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) modelo DJI Phantom 4 Pro,
114 con cámara integrada, caracterizada por un sensor CMOS de 1" de tamaño y 20
115 megapíxeles de resolución (Fig. 3c).

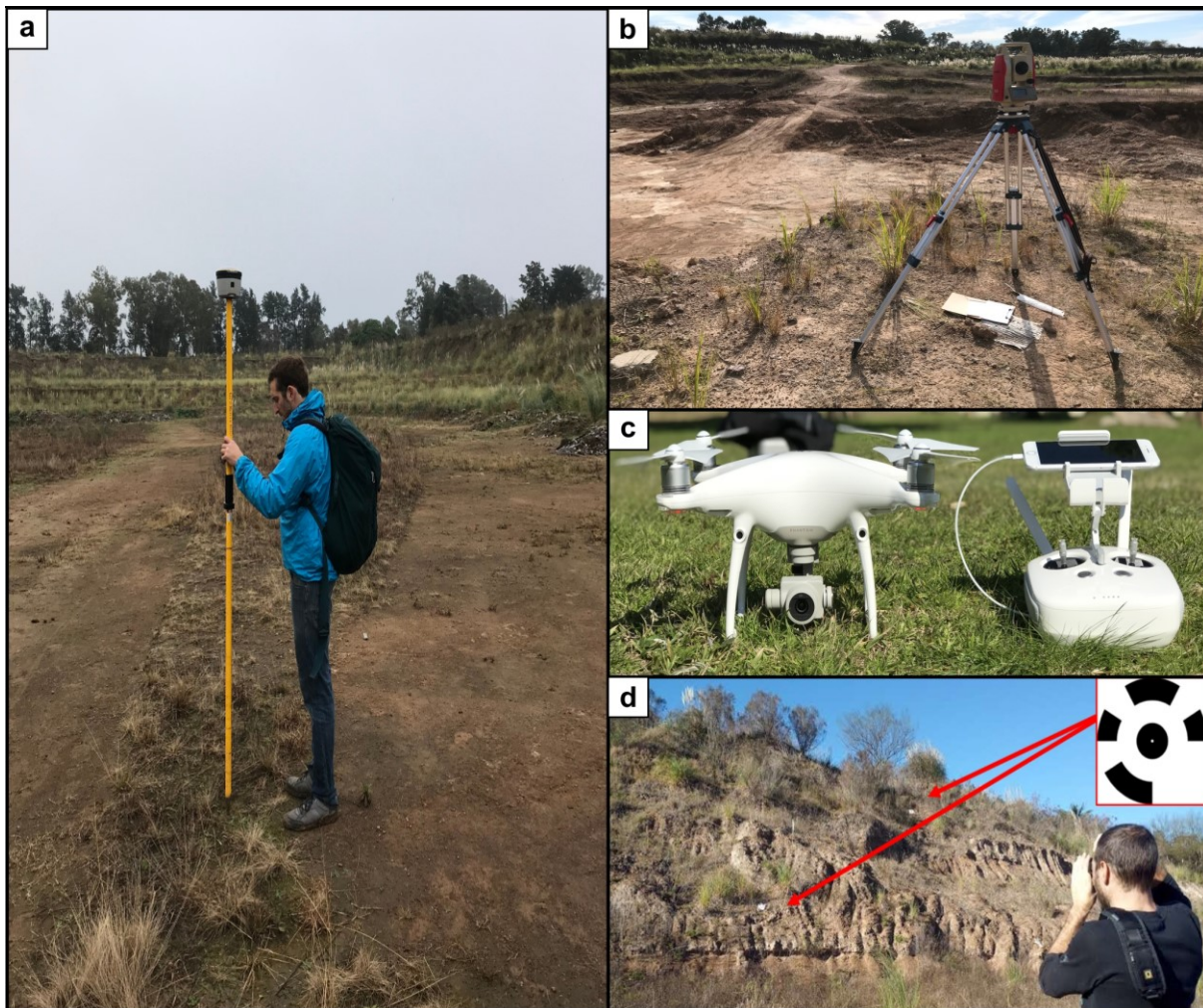
116 Con el fin de optimizar el tiempo de vuelo y garantizar la cobertura y superposición
117 necesarias, los planes de vuelo se diseñaron con la aplicación *Pix4Dcapture*, bajo
118 plataforma *iOS*. Se empleó el formato de diseño doble grilla, con líneas de vuelo
119 perpendiculares entre sí, garantizando un solapamiento frontal del 80 % y un solapamiento

120 lateral del 60 %. Se adquirieron en total 736 imágenes, las cuales se tomaron desde una
121 posición cenital. La superficie relevada fue de aproximadamente 40 hectáreas.

122

123 **Procesamiento de imágenes y análisis.** El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo
124 utilizando el *software* fotogramétrico *Agisoft Metashape Professional* bajo licencia
125 académica, cuyo flujo de trabajo se caracteriza por la aplicación de una serie de algoritmos
126 que llevan a cabo la reconstrucción de la escena en cuestión. Los principales algoritmos son
127 el SIFT (Lowe, 2004), que identifica para cada imagen, rasgos que resultan invariantes
128 respecto a la escala, rotación de la imagen, cambios en los puntos de vista
129 tridimensionales e iluminación, el *Bundler Adjustment* cuyo objetivo es reconstruir, de
130 manera simultánea, la estructura tridimensional, las variables de calibración de la
131 cámara (parámetros intrínsecos) y las posiciones y orientaciones de la cámara
132 (parámetros extrínsecos), dando como resultado una nube de puntos dispersa o abierta,
133 y el MVS (Furukawa y Ponce, 2010), los cuales permiten obtener una nube de puntos
134 densa, usualmente de millones de puntos con posición X, Y, y Z.

135 El resultado final fue la generación de un modelo digital de superficie (MDS). Para la
136 conversión de este modelo en un modelo digital de terreno (MDT), se utilizó el algoritmo
137 *Cloth Simulation Filter* (CSF, Zhang et al. 2016), integrado en el *software CloudCompare*.
138 Con este proceso, se eliminaron los objetos naturales y antrópicos que se encontraban
139 sobre la superficie del terreno (construcciones, vegetación, maquinaria). Este método utiliza
140 una secuencia de interpolación en la cual se genera una superficie grillada, con un tamaño
141 de celda definido por el usuario, y se realiza una evaluación y clasificación de los puntos que
142 se encuentran sobre la superficie interpolada como puntos fuera del terreno y puntos del
143 terreno, es decir, aquellos que se ajustan a la superficie. Se realizó una nueva interpolación
144 exclusivamente con los puntos clasificados como puntos del terreno (Anders et al. 2019),
145 obteniéndose de esta manera el MDT. El modelo digital del terreno final presenta una
146 resolución de 25 cm y un error cuadrático medio (*root mean square error*, RMSE) de 5.24
147 centímetros (Fig. 5).



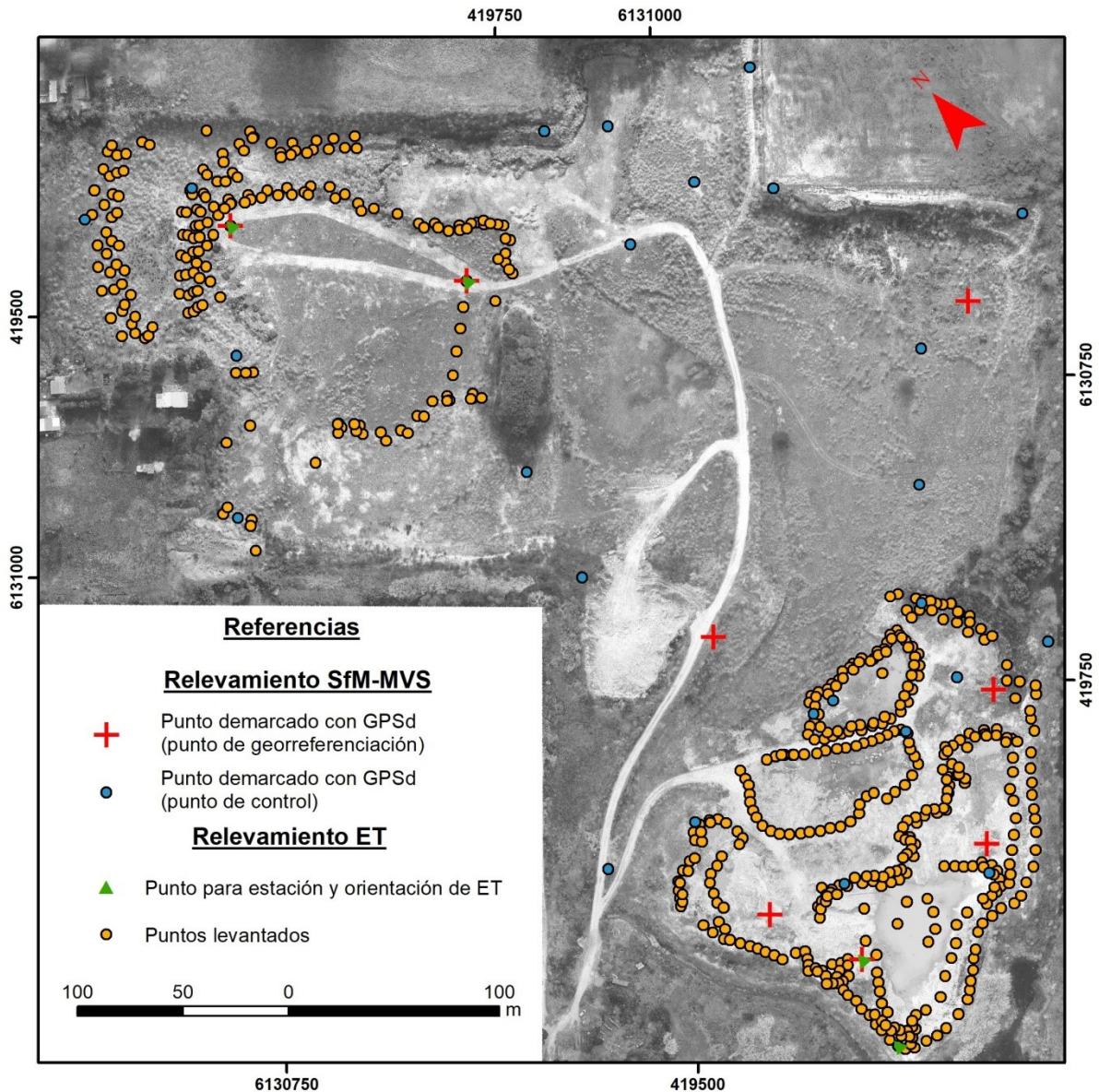
148

149 **Figura 3.** Metodología del trabajo: (a) toma de puntos con GPS diferencial, (b) relevamiento con estación total de
150 la cantera, (c) vehículo aéreo no tripulado y control empleados en el relevamiento aéreo y (d) marcadores
151 utilizados para identificar los puntos en el terreno.

152

153 **Validación del modelo SfM-MVS.** El modelo fue validado mediante la técnica de validación
154 con datos de altura de los PC del terreno (para más detalle véase Bilmes et al. 2019). Este
155 proceso fue realizado usando 27 PC con coordenadas X, Y, Z, obtenidos mediante GPSd.
156 Estos puntos no fueron utilizados para la georreferenciación del modelo, por lo tanto
157 constituyen puntos independientes y adecuados para la validación (Fig. 4). Se obtuvieron los
158 valores de altura del modelo SfM-MVS y se compararon con los valores de altura del GPSd.
159 Para ello, se extrajeron los valores de altura del modelo filtrado correspondiente a la
160 posición de los puntos y se realizó la diferencia entre el valor de altura entregado por la

161 lectura del GPSd y el valor extraído (Cuadro 1). La validación indica un error absoluto
162 promedio en la vertical de 9.26 centímetros.



163
164 **Figura 4.** Detalle de los puntos empleados para el relevamiento de la cantera a partir de las diferentes técnicas.
165 Se identifican los puntos tomados para el relevamiento con fotogrametría *Structure from Motion-Multi View*
166 *Stereo* (puntos de georreferenciación y puntos de control) y los puntos para el relevamiento del sector norte y sur
167 con estación total (puntos de posicionamiento y orientación del instrumental y puntos relevados).

168
169
170

Punto	Elevación GPSd [m.s.n.m.]	Elevación DEM Filtrado [m.s.n.m.]	ΔZ [m]
2	8.10	8.40	-0.30

3	6.77	6.69	0.08
4	6.09	5.99	0.10
5	7.37	7.30	0.07
6	14.07	13.75	0.32
7	7.48	7.37	0.11
8	2.97	2.85	0.12
11	8.46	8.20	0.26
12	2.62	2.52	0.10
13	2.37	2.36	0.01
14	3.84	3.80	0.04
15	8.69	8.35	0.34
16	10.78	10.80	-0.02
17	9.30	9.27	0.03
19	1.99	2.04	-0.05
20	1.57	1.65	-0.08
21	5.36	5.33	0.03
22	11.29	11.33	-0.04
24	1.71	1.66	0.05
25	1.48	1.38	0.10
27	-0.79	-0.77	-0.02
28	1.82	1.82	0.00
30	7.12	7.06	0.06
32	4.25	4.21	0.04
33	1.69	1.59	0.10
34	-0.36	-0.36	0.00
35	12.46	12.43	0.03

Cuadro 1. Validación del modelo SfM-MVS a partir de datos GPSd.

171
172

173 Comparación de modelos

174 La comparación entre técnicas para ambos sectores se realizó mediante un *DEM of*
175 *Difference* (DoD), a partir de la sustracción algebraica de los valores de altura de cada píxel
176 del MDT SfM-MVS (MDT_{SfM}) y el MDT tradicional (MDT_{ET}), es decir, $MDT_{SfM} - MDT_{ET}$. A su
177 vez, se realizaron cálculos de volumen en cada uno de los sectores. Tanto el DoD como los
178 cálculos de volumen se efectuaron empleando el *software ArcGIS 10.0*.

179

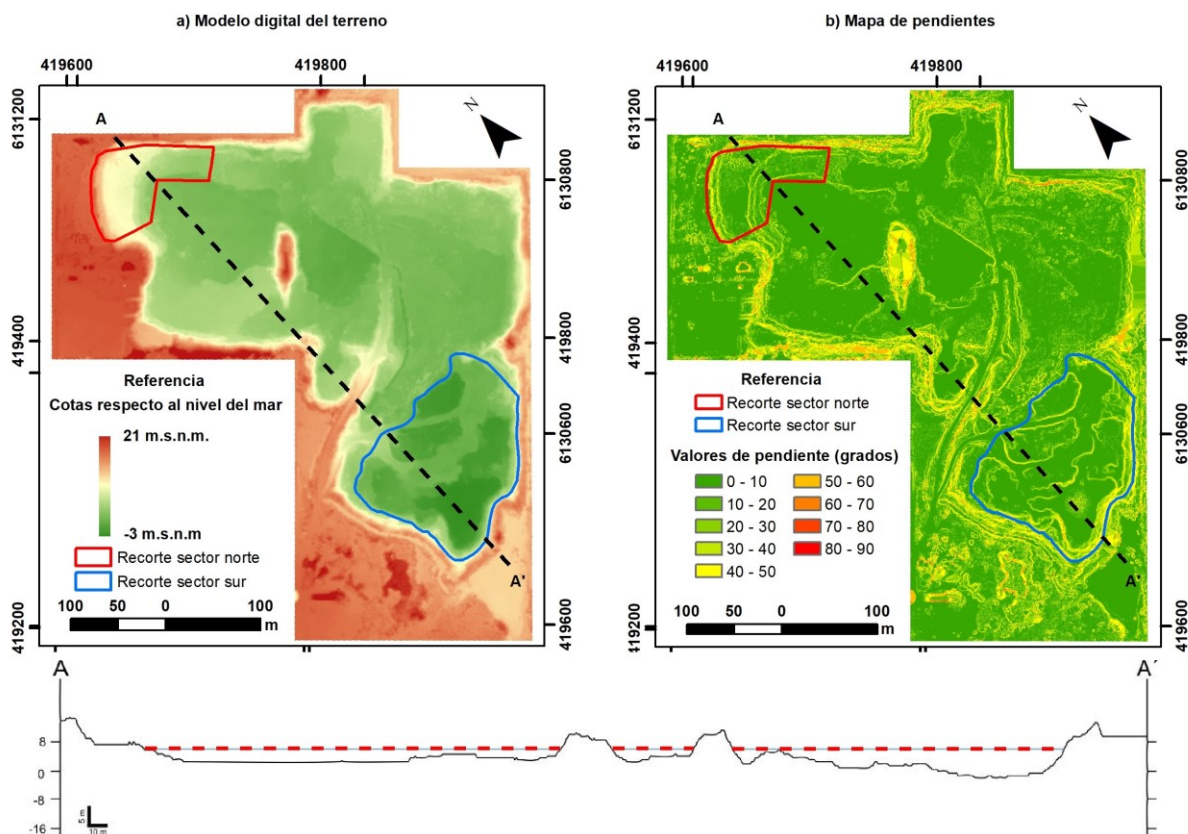
180 RESULTADOS

181

182 En análisis del modelo de elevación del terreno obtenido mediante el relevamiento
183 SfM-MVS indica que las mayores alturas se encuentran principalmente en los límites de la
184 cantera y en un pequeño sector elongado ubicado en el sector centro norte del área
185 relevada, que se corresponde a una zona remanente de la explotación, alcanzando valores

186 de 21 m (Fig. 5a). Por otro lado, las menores alturas se encuentran principalmente en el
187 sector sur, donde se registran cotas de -3 metros.

188 Las mayores pendientes de la cantera se observan en los márgenes (Fig. 5b), con
189 superficies caracterizadas por gradientes comprendidos principalmente entre 45° y 60°,
190 pudiendo superar incluso 70°, mientras que, hacia el interior de la misma, las pendientes
191 tienden a ser más suaves. En el sector norte el piso de cantera es plano y tiene una cota de
192 2 metros. En el extremo noroeste del mismo se presenta un banco con morfología
193 rectangular elevado aproximadamente 5 m por encima del piso de la cantera. Por otro lado,
194 el sector sur exhibe una mayor profundidad y la topografía en esta zona presenta mayores
195 variaciones en las pendientes, con caminos internos y una explotación mucho más selectiva,
196 que alcanza las cotas más bajas en el extremo sudeste de la cantera, con valores de hasta -
197 3 m (Fig. 5).



198
199 **Figura 5.** Modelo digital del terreno, mapa de pendientes de la cantera Alonso-Di Ianni y perfil topográfico que
200 atraviesa el sector norte y el sector sur. La línea roja discontinua del perfil indica la superficie de referencia (6 m)
201 utilizada para el cálculo de volumen.

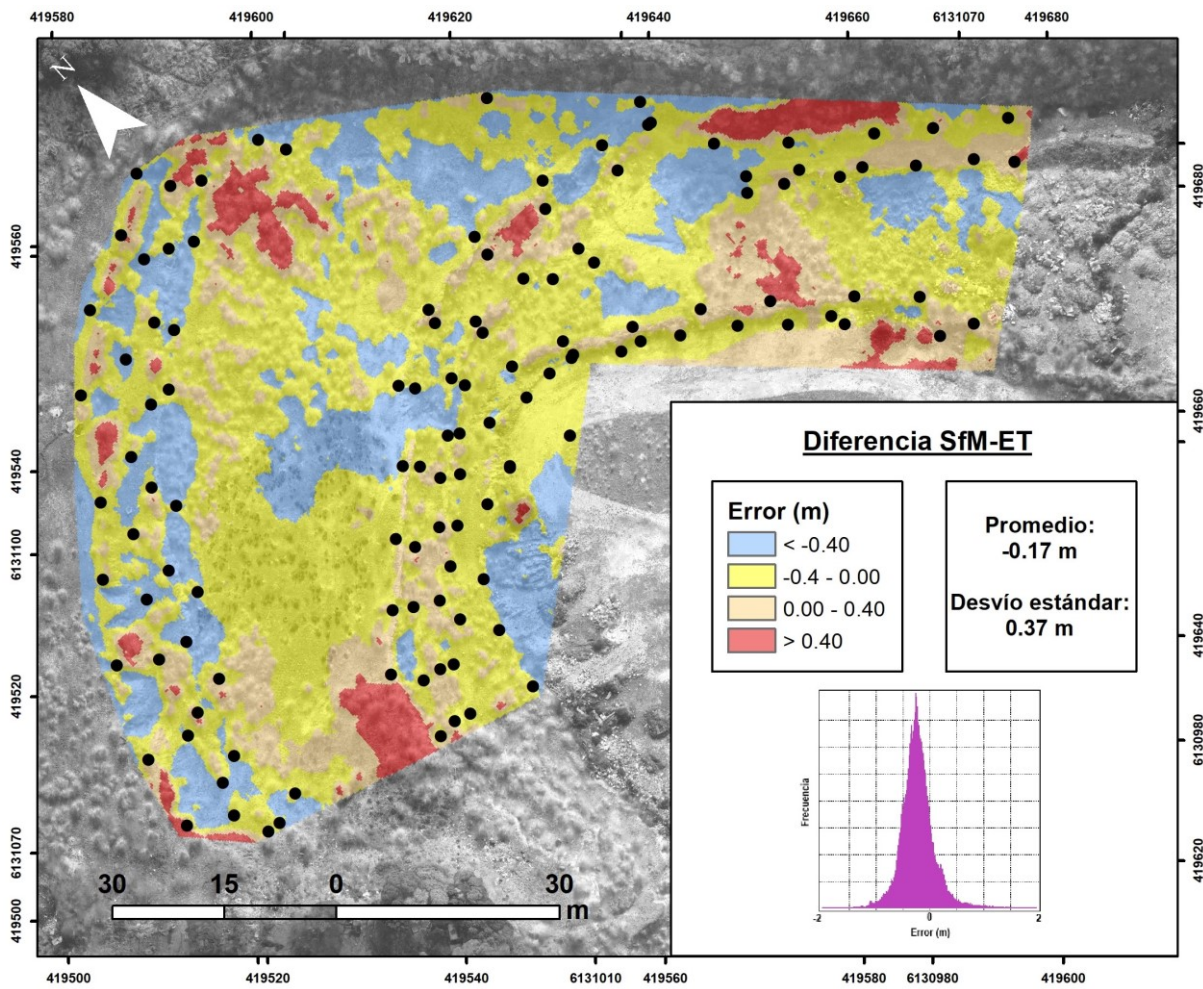
202

203 **Diferencia entre los modelos de elevación digitales**

204 El análisis de los *DEM of Difference* (DoD) de los sectores norte y sur (Fig. 6 y Fig. 7)
205 y los cálculos de volumen, comparativos de las técnicas SfM-MVS y ET, permiten definir
206 patrones, con los cuales pueden determinarse alcances y limitaciones de ambas técnicas
207 como herramientas topográficas y para realizar cálculos de volumen.

208 En el sector norte, las variaciones de altura registradas en el DoD presentan un
209 promedio de - 0.17 cm. En la zona relevada, los errores registrados varían mayoritariamente
210 entre - 0.40 y 0.40 m (Fig. 6). Localmente, hay zonas con errores mayores, con datos
211 puntuales mínimo y máximo de - 2.25 y 2.42 m, respectivamente. Las zonas que registran
212 las mayores diferencias entre ambos modelos corresponden a sectores sin puntos relevados
213 en el campo con ET, cuyas alturas han sido interpoladas en el modelo final (MDT_{ET}). A su
214 vez, se observan zonas puntuales donde el error es inferior a - 0.40 y superior a 0.40
215 metros, en las cuales las pendientes resultan ser bajas. Esto podría deberse a que, si bien
216 no hay datos relevados, dichos sectores coinciden con la presencia de vegetación tupida y
217 densa, que podría estar introduciendo errores debido al filtrado incorrecto de la misma.

218 Con respecto al sector sur, se observa un comportamiento de errores similar al
219 modelo previamente descrito. El modelo diferencial obtenido muestra que las variaciones
220 en términos de error promedio del modelo son de - 0.10 m, con predominio de zonas con
221 errores comprendidos entre - 0.40 y 0.40 m, en donde se registran todos los puntos
222 relevados en el campo (Fig. 7). Las mayores diferencias registraron valores puntuales
223 mínimo y máximo de hasta - 2.91 y 2.44 m respectivamente. Estos valores se ubican en
224 regiones donde los datos de ET fueron interpolados y en regiones con pendientes elevadas
225 (mayores a 30°).



226

227

Figura 6. DEM of Difference del sector norte.

MANUSCRITO

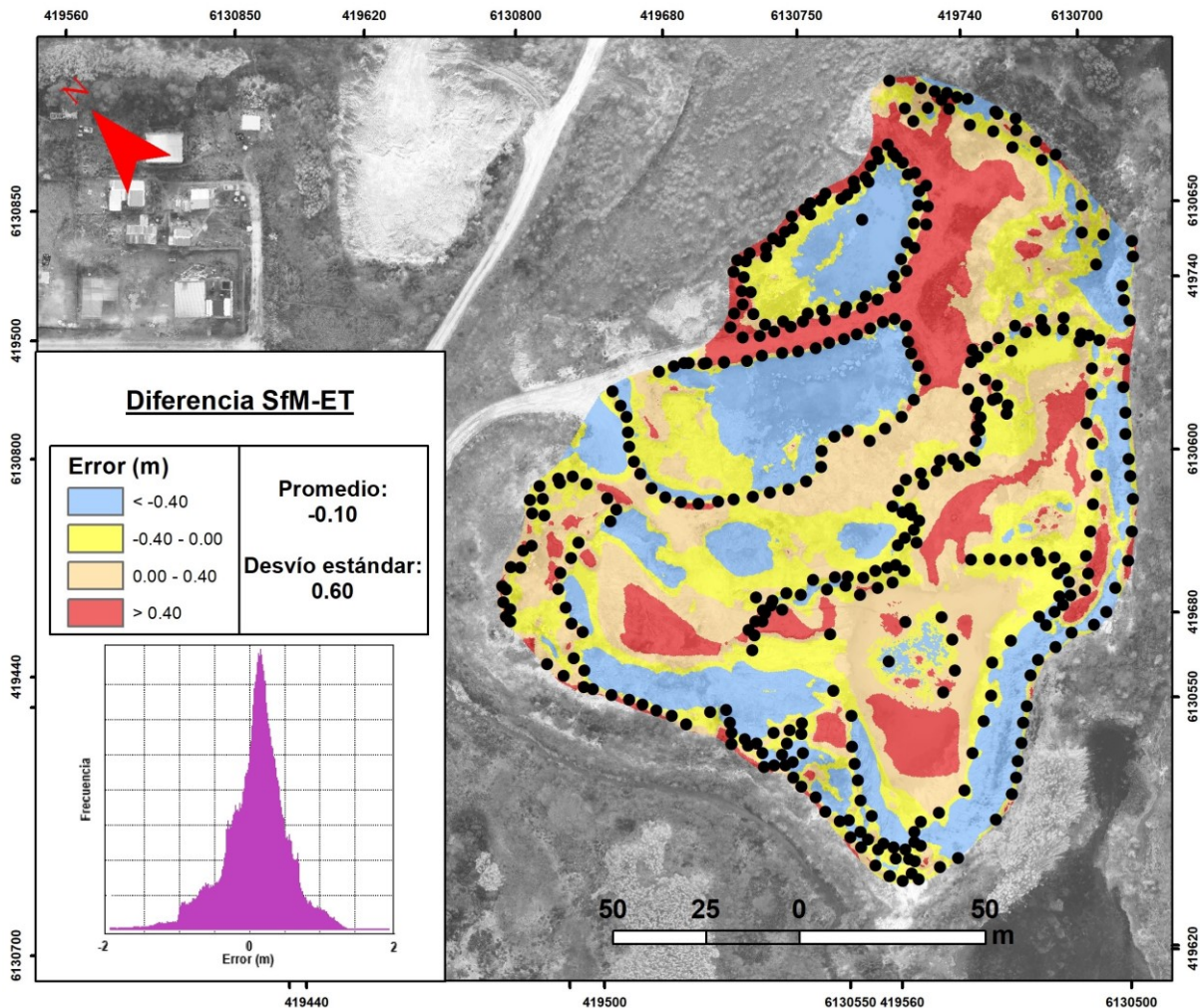


Figura 7. DEM of Difference del sector sur.

Cálculo de volumen

A fin de comparar las técnicas, se realizaron cálculos volumétricos de los dos sectores para determinar cuantitativamente las diferencias obtenidas a partir de los dos modelos generados.

Para obtener el volumen extraído, se definió un plano horizontal de referencia, por debajo del cual se realizaron los cálculos. Para ambos sectores, los volúmenes se calcularon tomando como referencia la cota de 6 metros.

Los resultados de los cálculos (Cuadro 2) muestran que los volúmenes en el sector norte para SfM-MVS y ET son 6190.05 m^3 y 5623.86 m^3 , respectivamente. En el caso del sector sur, el volumen calculado a partir del modelo SfM-MVS es de 110526.49 m^3 mientras que el volumen a partir del modelo relevado mediante ET es de 108342.91 m^3 .

Técnica de relevamiento	Volumen [m ³]	
	Sector norte	Sector sur
SfM-MVS	6190.05	110526.49
ET	5623.86	108342.91
Diferencia entre los modelos	566.19 (9.14%)	2183.58 (1.97 %)

242 **Cuadro 2.** Resultados de los cálculos volumétricos en ambos sectores, para las dos técnicas de relevamiento
243 empleadas.

244

245 **DISCUSIÓN**

246

247 Los modelos obtenidos con ET y SfM-MVS muestran significativa concordancia en
248 gran parte de ellos. Sin embargo, se han registrado diferencias y/o desviaciones
249 sectorizadas, en lo que respecta a la coordenada vertical. Conocer las fuentes de estas
250 diferencias es primordial para evitar sobreestimaciones o subestimaciones de áreas o
251 volúmenes que provengan de un modelo de elevación digital del terreno.

252 El error intrínseco de la técnica fotogramétrica SfM-MVS, normalmente cuantificado a
253 partir del Error Cuadrático Medio del modelo (RMSE), depende fundamentalmente de la
254 distancia de adquisición de las fotografías y de la cantidad y distribución de los puntos
255 utilizados para la georreferenciación y validación de los modelos (Carrivick et al. 2016,
256 Clapuyt et al. 2016, Sanz-Ablanedo et al. 2018, Bilmes et al. 2019). Los errores promedio de
257 los modelos norte y sur (- 0.10 y - 0.17 m, Fig. 6 y Fig. 7), presentaron valores coherentes
258 con el RMSE esperado para la altura de vuelo utilizada en este trabajo, es decir, con una
259 altura de vuelo de 108 m sobre el terreno, es esperable un RSME de ± 0.205 m (Carrivick et
260 al. 2016). Por otra parte, la demarcación y utilización de puntos de georreferenciación (n = 8)
261 y puntos de validación (n = 27) distribuidos de manera homogénea en la zona de estudio
262 permitió obtener un modelo final validado con un RMSE subdecimétrico, de solo 9.26
263 centímetros.

264 La calidad del modelo construido descarta posibles fuentes de error intrínsecas de la
265 técnica SfM-MVS y habilita el análisis de potenciales fuentes de error extrínsecas que
266 expliquen diferencias entre esta técnica y el relevamiento con ET.

267 Los resultados obtenidos permiten avanzar en la discusión de tres fuentes
268 potenciales de error, que incluyen: (a) problemas de interpolación de los puntos tomados
269 con la ET, (b) problemas de registro de ET y SfM-MVS en zonas con pendientes
270 pronunciadas y (c) problemas de registro de zonas con cambios contrastantes de vegetación
271 con la técnica SfM-MVS.

272 Al realizar un relevamiento mediante la obtención directa de cada punto (ET), se
273 establece un criterio subjetivo en la adquisición de los datos. La toma de puntos en los
274 quiebres de pendientes resulta la mejor estrategia para el relevamiento (Bangen et al. 2014),
275 ya que reduce el número de puntos para representar la topografía (Brasington et al. 2003).
276 Por lo tanto, el relevamiento estará condicionado por la experiencia, entrenamiento y
277 habilidad del operador, mientras que la precisión y exactitud del modelo final dependerán de
278 esto último.

279 Los puntos relevados con ET son representativos de la superficie, sin embargo, al no
280 tratarse de un levantamiento sistemático, pueden existir áreas carentes de información o con
281 irregularidades topográficas menores, que son descartadas por el operador. En tal sentido,
282 el método de interpolación lleva a simplificaciones que, como puede verse en este trabajo,
283 generan las mayores divergencias entre las técnicas (Fig. 6 y Fig. 7). En los sectores donde
284 fueron relevados puntos con ET, se registran errores por debajo de 0.4 m (Fig. 6 y Fig. 7). Si
285 se observan los sectores adyacentes a los puntos, se refleja un incremento en el error, por
286 encima del valor mencionado. Vinculado a la interpolación, también se observa que los
287 cálculos de volumen reflejan subestimaciones para el caso de la técnica tradicional.

288 Los problemas de registro de ET y SfM-MVS en zonas con pendientes pronunciadas
289 ya han sido descritos en la literatura, demostrándose que pueden desarrollarse errores de
290 hasta un orden de magnitud superior a la media del modelo en zonas con elevados valores
291 de pendiente (Tonkin et al. 2014).

292 Los sectores con valores de pendiente elevados, como el límite oriental del sector sur
293 de este trabajo, muestran una diferencia importante entre los valores de altura de los puntos
294 tomados con ET y los valores de altura extraídos del MDT SfM-MVS para los mismos
295 puntos, en donde zonas con valores de pendiente mayores a 30° registran diferencias de
296 más de un metro de error en la componente vertical (Fig. 7).

297 Finalmente, otro factor que influye en las diferencias encontradas entre los modelos
298 generados por las distintas técnicas se encuentra en la presencia o ausencia de vegetación.
299 La vegetación constituye un factor que influye negativamente, tanto por la dificultad para
300 representar correctamente la superficie de los modelos de elevación fotogramétricos como
301 también por bajar la calidad de los mismos (Micheletti et al. 2014, Tonkin et al. 2014). Para
302 minimizar el impacto de la vegetación en el modelo final, se realizó un filtrado con el fin de
303 eliminar tanto la vegetación como otros objetos antrópicos. Este algoritmo emplea un filtro
304 que separa los puntos correspondientes al terreno de aquellos que sobresalen del mismo, y
305 estos últimos son eliminados, por lo tanto los valores de cota de estas zonas son
306 interpolados a partir de los puntos cercanos, lo cual puede introducir errores en el resultado
307 final. Sin embargo, en zonas con vegetación densa y a pesar del filtrado realizado, resulta
308 difícil evitar diferencias superiores a 0.4 m que pueden llegar a superar 1 m (Fig. 6).

309 Relevar con ET la densidad de puntos que se obtiene en un modelo de SfM-MVS
310 implica tiempos y logísticas poco viables para los plazos y condiciones normales de un
311 levantamiento topográfico. Por otra parte, si bien los MDT construidos a partir de
312 fotogrametría SfM-MVS aérea pueden registrar problemas considerables en zonas con
313 cambios de patrones en cuanto a la vegetación y pendientes superiores a 30° , la alta
314 densidad de puntos relevados por superficie minimiza las áreas con información interpolada,
315 algo que este trabajo demuestra ser uno de los puntos más débiles de los MDT construidos
316 con ET. La precisión en el cálculo de volumen de recursos naturales utilizando la técnica
317 SfM-MVS resulta muy aceptable respecto de la técnica tradicional con ET. Si bien la
318 validación del modelo SfM-MVS demuestra un error asociado al mismo, la densidad de
319 datos relevada con ET resulta acotada en comparación con la anterior, por lo cual pueden

320 existir subestimaciones o sobreestimaciones que representen más del 9 % del volumen total
321 calculado.

322 Por otro lado, se observa que en zonas con diferencias de altura de 10 m
323 aproximadamente (sector sur) o mayores, la diferencia entre las técnicas para el cálculo de
324 volumen resulta ser baja. Si la diferencia de altura entre el plano de referencia y la superficie
325 del terreno es de 2 m o menor (sector norte), las divergencias entre los modelos pueden
326 alcanzar errores de cálculo del orden del 10 %.

327

328 **CONCLUSIONES**

329

330 Se realizó la comparación de técnicas de relevamiento topográfico con Estación Total
331 y con fotogrametría SfM-MVS en una cantera de suelos de la localidad de La Plata,
332 obteniéndose como resultado dos modelos de elevación que muestran gran concordancia
333 entre sí. El modelo SfM-MVS fue validado empleando puntos tomados con GPSd que no se
334 emplearon en la georreferenciación del mismo y los errores correspondientes a la
335 coordenada vertical se encuentran comprendidos entre ± 0.30 m, siendo el promedio
336 absoluto de 9.26 cm. Las mayores diferencias entre los modelos se vinculan, en el
337 relevamiento con ET, a la interpolación de los puntos levantados, mientras que en el caso
338 del modelo SfM-MVS los mayores errores están asociados principalmente a zonas con
339 pendientes pronunciadas, registrándose variaciones menores que pueden ser explicadas
340 por la presencia de vegetación en ambos sectores. Por otra parte, los cálculos de volumen
341 realizados arrojan diferencias que llegan a ser del 10 %, que se relacionan principalmente a
342 la densidad de puntos obtenida con cada técnica y a la diferencia de altura entre la
343 superficie de referencia y el piso del terreno.

344 La técnica SfM-MVS resulta una herramienta rápida, de bajo costo y efectiva para
345 llevar a cabo relevamientos de canteras debido a que la alta densidad de puntos, sumada al
346 registro sistemático de los mismos, producen representaciones realistas de las zonas
347 relevadas.

348

349 **AGRADECIMIENTOS**

350 Los autores desean expresar su agradecimiento al señor Gastón, propietario de la cantera
351 Alonso-Di Ianni, por su gran predisposición y por facilitar el ingreso a la misma las veces
352 necesarias para poder llevar a cabo las tareas de campo correspondientes, como así
353 también a la revisora Erika Sofía Upegui y el revisor Carlos Hermann por las correcciones y
354 comentarios realizados sobre el manuscrito, los cuales ayudaron a mejorar sustancialmente
355 la calidad del mismo.

MANUSCRITO ACEPTADO

356 **REFERENCIAS**

- 357 Anders, N., Valente, J., Masselink, R. y Keesstra, S. 2019. Comparing Filtering Techniques
358 for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. Drones
359 3(3): 61.
- 360 Bangen, S. G., Wheaton, J. M., Bouwes, N., Bouwes, B. y Jordan, C. 2014. A
361 methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing
362 wadeable streams and rivers. *Geomorphology* 206: 343-361.
- 363 Bilmes, A., D'Elia, L., Lopez, L., Richiano, S., Varela, A., Álvarez, M., Bucher, J., Eymard, I.,
364 Muravchik, M., Franzese, J. y Ariztegui, D. 2019. Digital outcrop modelling using
365 "structure-from-motion" photogrammetry: Acquisition strategies, validation and
366 interpretations to different sedimentary environments. *Journal of South American
367 Earth Sciences* 96, 102325.
- 368 Brasington, J., Langham, J. y Rumsby, B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric
369 estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53 (3-4): 299-316.
- 370 Carrivick, J. L., Smith, M. W. y Quincey, D. J. 2016. *Structure from Motion in the
371 Geosciences*. Wiley-Blackwell, 197 p. Oxford, United Kingdom.
- 372 Clapuyt, F., Vanacker, V. y Van Oost, K. 2016. Reproducibility of UAV-based earth
373 topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms.
374 *Geomorphology* 260: 4-15.
- 375 D'elia, L., Bilmes, A., García, M., Bucher, J., López, M., Feo, R. y Franzese, J. 2021. Análisis
376 Estructural y Tectono-Estratigráfico a partir de afloramientos virtuales y métodos
377 tradicionales de campo de los depósitos sinorogénicos miocenos (Formación La
378 Pava) en el sector norte del antepaís fragmentado patagónico. *Revista de la
379 Asociación Geológica Argentina* 78(1).
- 380 Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L. y Carbonneau, P. E. 2013.
381 Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric
382 measurement. *Earth surface processes and Landforms* 38(4): 421-430.

- 383 Furukawa, Y. y Ponce, J. 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, IEEE
384 Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32: 1362-1376.
- 385 Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International
386 Journal of Computer Vision 60: 91-110.
- 387 Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R. y Ordóñez, C. 2018. Accuracy of
388 unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the
389 number and location of ground control points used. Remote Sensing 10(10): 1606.
- 390 Snavely, N., Seitz, S. M. y Szeliski, R. 2006. Photo tourism: exploring photo collections in
391 3D. ACM Transactions on Graphics 25(3): 835-846.
- 392 Snavely, N., Seitz, S. M. y Szeliski, R. 2008. Modeling the world from internet photo
393 collections. International journal of computer vision 80(2): 189-210.
- 394 Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Graham, D. J. y Labadz, J. C. 2014. The potential of small
395 unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test
396 of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. Geomorphology 226:
397 35-43.
- 398 Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. y Reynolds, J. M. 2012.
399 "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience
400 applications. Geomorphology 179: 300-314.
- 401 Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. y Yan, G. 2016. An Easy-to-Use
402 Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing
403 8(6): 501.