

## ESTUDIO DE CASO PARA LA EVALUACIÓN DE PRECISIONES OBTENIDAS EN RELEVAMIENTOS TOPOGRÁFICOS UTILIZANDO VANT: NAVEGADOR GPS vs. PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO

**Marcos A Reche**

Centro de Investigación Docencia y Extensión en Producción Agropecuaria (CIDEPA),  
Universidad Nacional de Luján  
[dircidepa@unlu.edu.ar](mailto:dircidepa@unlu.edu.ar)

**Rafael Peña**

Dirección Cartográfica, Proceso de Planificación y Captura UAV, Instituto Geográfico Militar del  
Ecuador  
[rafael.pena@geograficomilitar.gob.ec](mailto:rafael.pena@geograficomilitar.gob.ec)

**Sonia L. Lanzelotti**

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de  
Investigaciones Geográficas (INIGEO), Universidad Nacional de Luján  
[sonia.lanzelotti@conicet.gov.ar](mailto:sonia.lanzelotti@conicet.gov.ar)

### Resumen

Se presentan los resultados de un estudio de caso que permite comparar la precisión de los productos topográficos obtenidos por restitución fotogramétrica a partir de relevamientos aéreos con drone/VANT. El estudio se realizó sobre un lote de 20 has en el partido de Baradero, provincia de Buenos Aires, Argentina. Se tomaron 11 Puntos de Control en el Terreno (PCT), que se utilizaron como Puntos de Verificación para estimar la precisión del Modelo de Elevación Digital (MDE) generado a partir del sistema GPS integrado al drone, y también como Puntos de Apoyo Fotogramétrico (PAF) para la generación de un segundo MDE que los incluyera en el proceso de restitución. Se observó que los mayores errores en altitud (eje Z) en los MDE corresponden al Modelo 1, pero no obstante, estos errores se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda la superficie relevada y que cobran nulo significado en escalas de representación mayores a 1:500. La elección de una escala adecuada depende para los propósitos para los cuales se utilizará la cartografía.

**Palabras clave:** Fotogrametría, Drone, VANT, Modelo de Elevación Digital

### CASE STUDY FOR THE EVALUATION OF PRECISION OBTAINED IN TOPOGRAPHIC SURVEY USING UAV: GPS NAVIGATOR vs. PHOTOGRAMMETRIC SUPPORT POINTS

#### Abstract

A case study that allows comparing the precision of the topographic products obtained by photogrammetric restitution from an aerial survey carried out with a drone or UAV is presented. The case was carried on a 20-hectare lot in the Baradero district, Buenos Aires province, Argentina. Eleven Ground Control Points (PCT) were taken, which were used as Verification Points to estimate the accuracy of the Digital Elevation Model (DEM) generated from the GPS system integrated into the drone, and also as Photogrammetric Support Points (PAP) for the generation of a second MDE that included them in the restitution process. It was observed that the greatest errors in altitude (Z axis) in the DEMs correspond to Model 1, but nonetheless, these errors are distributed homogeneously throughout the entire surveyed surface and they have no meaning at representation scales greater than 1: 500. The choice of a suitable scale depends on the purposes for which the mapping will be used.

**Keywords:** Photogrammetry, Drone, UAV, Digital Elevation Model.

## INTRODUCCIÓN

La elaboración de productos cartográficos a partir de información relevada con VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) es cada vez más frecuente y de fácil acceso. Sin embargo, es necesario tomar en consideración que los productos topográficos derivados de información capturada mediante VANTs requieren validación y calibración local bajo condiciones de campo para ser considerados de alta precisión.

De acuerdo a Jiménez-Jiménez et al. (2017), los MDE (Modelos Digitales de Elevación) derivados de la fotogrametría con VANT contienen errores, ya sea sistemáticos o accidentales, que ocurren desde la planificación del vuelo hasta el procesamiento de las imágenes. Los “errores sistemáticos” pueden deberse a la precisión que brinda el GPS con el que se obtiene las coordenadas de los Puntos de Control Terrestre (PCT) (Gómez-Candón et al. 2014), a la sensibilidad del VANT a la presencia de viento (ya que no se puede asegurar un traslape regular de las imágenes), a la capacidad de pilotaje autónomo del VANT o calidad baja de sus sensores (esto puede afectar aleatoriamente su altitud y ubicación en el vuelo) (Nex y Remondino 2014), al tipo de VANT seleccionado (los multirrotores son más estables que los de ala fija) y a la precisión geométrica de la cámara provocada por la distorsión del objetivo. Por otro lado, y de acuerdo a los mismos autores, los errores accidentales pueden deberse a la falta de calibración de los parámetros internos de la cámara (Nex y Remondino, 2014), al porcentaje bajo de traslape entre imágenes (< 70 %), al enfoque de la cámara en el vuelo (ya que puede que no se mantenga fijo, lo que hace que la distancia focal varíe) (Cabezos y Cisneros 2012), al número de PCT seleccionados y a su distribución en el terreno (Grenzdörffer et al. 2008) y a la deficiente identificación de los PCT en las imágenes dentro del programa de restitución fotogramétrica (Westoby et al. 2012).

La Radiometría de las imágenes también juega un papel muy importante, dependiendo de la luminosidad que estas imágenes posean. Tal es el caso cuando el sol de mediodía pega con mucha intensidad ciertos elementos generan un brillo lo que impide que trabajen los algoritmos de correlación. Ejemplos: cuerpos de agua, vías pavimentadas, techos de zinc, nieve. Y caso contrario sucede también cuando hay poca luz. Las mejores imágenes de toma para drone bajo las nubes no tienes el problema de sombras y sobre exposición lumínica.

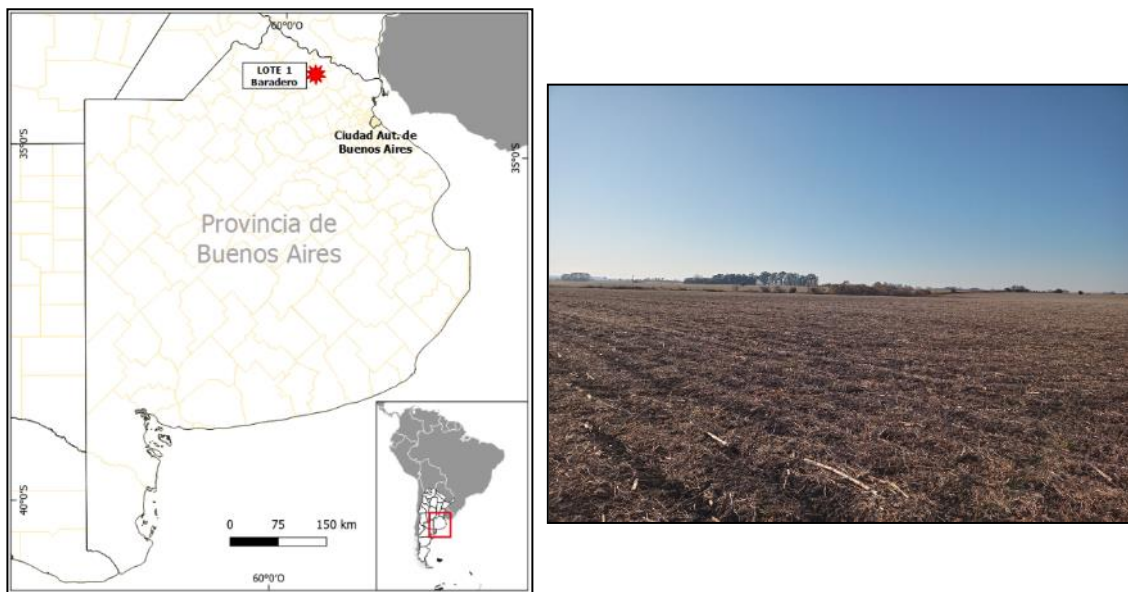
Los estudios indicados señalan que la mayor distorsión en los productos fotogramétricos se registra en los datos de altitud (eje Z), en tanto que en los ejes X e Y, los errores son notablemente menores. Debido a esto, diversos autores han cuantificado el error únicamente en el eje vertical utilizando VANT multirrotor (Tamminga et al. 2014; y Uysal et al. 2015); o VANT de Ala Fija (Hugenholtz et al. 2013). Comparando los resultados obtenidos, se observa que los multirrotores tienen errores de 3 a 4 veces menores que el relevamiento con Ala Fija. Por otro lado, Nex y Remondino (2014) mencionan que el error cuadrático medio (RCME) en los tres ejes de los modelos digitales generados por fotogrametría con VANT puede llegar a ser menor de 10 cm., o de dos a tres veces el tamaño del pixel de las imágenes adquiridas (o de la resolución espacial del ortomosaico). Jiménez-Jiménez et al. (2017) señalan que los modelos georreferenciados con 9, 10 y 11 PCT tienen RCME menores a 10 cm en los tres ejes; sin embargo, únicamente el georreferenciado con 11 PCT tiene un RCME de 5.9 cm, lo que representa menos de tres veces la resolución del ortomosaico (2 cm-pixel-1). Por lo tanto, este último podría representar con alta precisión la topografía de un sitio.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el presente trabajo fue realizado con el objetivo comparar de la precisión obtenida en los productos topográficos elaborados a partir de información capturada mediante VANT tomando en consideración la información georreferenciada obtenida por el navegador GPS del VANT, respecto de aquella obtenida utilizando Puntos de Apoyo Fotogramétrico tomados con Nivel Óptico. Para ello se desarrolla el caso de estudio, se detalla la metodología empleada y se discuten los resultados obtenidos con el propósito de orientar la toma de decisiones metodológicas para futuros casos de aplicación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El relevamiento se realizó en la zona rural del partido de Baradero, provincia de Buenos Aires, Argentina. Se trata de un lote (denominado “Lote 1”) de forma rectangular de 350x430 m de lado, entre las coordenadas 59,494339 y 59,487693 de Long Oeste, y 33,983279 y 33,9776665 de Latitud Sur en Sistema de Referencia WGS 84. Las imágenes aéreas se adquirieron de las 15:56 a las 16:41 hs del día 2 de junio de 2022, y las condiciones climáticas de ese día fueron despejado, calmo y con una temperatura de 13°C.<sup>1</sup> (Figura 1).

**Figura 1: Ubicación y foto de contexto del Lote 1 en el partido de Baradero, provincia de Buenos Aires**



## Equipamiento

El VANT empleado para la toma de las imágenes fue un Parrot ANAFI con 4 baterías. Este vehículo realiza un despegue y aterrizaje vertical, posee una autonomía de vuelo del orden de 15-20 min por batería, y está dotado de un sistema GPS convencional que le permite ejecutar misiones programadas y accionar automáticamente la captura de las imágenes según la configuración de la misión de vuelo.

Se tomaron Puntos de Control en el Terreno (PCT), que se utilizaron como Puntos de Verificación para estimar la precisión del Modelo de Elevación Digital (MDE) generado a partir del sistema GPS integrado al dron, y también como Puntos de Apoyo Fotogramétrico (PAF) para la generación de un segundo Modelo de Elevación Digital que los incluyera, y comparar así la calidad de los productos cartográficos elaborados. Para el registro de estos PCT se trazó un sistema de coordenadas locales con cinta métrica, a partir de dos ejes perpendiculares en forma de “L”, colocando marcadores cada 50 metros de distancia en los ejes denominados XY, en tanto que el valor de Z se tomó utilizando un nivel óptico, que brinda asimismo una precisión de 0,5 cm.

Las coordenadas XY de los PCT se obtuvieron el mismo día del vuelo en sistema métrico local, tomando los valores 0,0 en el PT 6. Para la georreferenciación de todo el sistema se tomó un punto

<sup>1</sup> Datos de la Estación Meteorológica Mariano Moreno Aero, del Servicio Meteorológico Nacional, ubicada a unos 85 km del sitio relevado.

GPS en coordenadas de Longitud y Latitud geográficas en WAG 84 en este mismo punto (PT 6) y en los puntos extremos (PT1 y PT12), utilizando un Garmin GPSMAP 64S. Se midió el rumbo del eje Y, arrojando un valor de 42,22°E. El valor de altitud indicado por el nivel óptico se corrigió utilizando el valor de cota oficial para la zona, tomado del MDE del Instituto Geográfico Nacional (fotograma 3060-35 de 30m de resolución de pixel) en el mismo PT 6.

Posteriormente en gabinete se utilizó el programa QGIS para la transformación de coordenadas locales a sistema geográfico, y a POSGAR 2007 Faja 5, manteniendo en todos los casos los datos de altitud medida con nivel óptico ajustados a la cota del IGN (Ver Tabla 1). El Sistema de Referencia Geográfico WGS84 se utilizó para la instancia de colocación de los PAF, en tanto que el Sistema POSGAR 2007 Faja 5 se utilizó para la exportación de los DEM, y Ortofotos y toda la elaboración de cartografía con QGIS.

En campo se procuró que los PCT cumplieran una serie de características (tomado de Góngora 2020):

- Ser claramente identificables en todas las fotografías en las que aparezcan.
- Ser estables en el lugar donde han sido marcados.
- Tener una dimensión apropiada para la escala de la fotografía.

Así, los PCT se materializaron con lonas de 50 cm de lado, divididas en cuadrantes con distinto diseño de pintura roja cada uno, para su identificación posterior (Figura 2). Se colocaron así 12 PCT sobre el terreno antes de la realización del vuelo para asegurar su identificación en las imágenes, debiéndose descartar posteriormente un punto (PT1) por la cobertura vegetal que lo rodeaba e impedía su correcto avistaje desde las fotografías aéreas. De este modo, se utilizaron efectivamente los 11 puntos restantes, numerados como PT 2 a PT 12.

**Tabla 1. Coordenadas correspondientes a los Puntos de Control Terrestre tomados en el campo con cinta métrica y su conversión a los sistemas geográfico (WGS84) y plano local (POSGAR 2007, Faja 5) convertidos con QGIS; y altitud medida con nivel óptico y corregido en base al IGN.**

Puntos de Control Terrestre (PT N°)	Coordenadas							
	Locales (m)			Coord. Geográficas (WGS84)		Posgar 2007 Faja 5		Altitud (msnm)
	x	y	z	Long.	Lat.	X long	Y lat	Z
2	0.0	200.0	18.170	-59.491133	-33.978251	5547023.77	6240600.08	20.58
3	0.0	150.0	18.600	-59.491504	-33.978579	5546989.31	6240563.84	21.01
4	0.0	100.0	19.190	-59.491875	-33.978907	5546954.86	6240527.61	21.60
5	0.0	50.0	19.830	-59.492246	-33.979235	5546920.41	6240491.37	22.24
<b>6*</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>20.360</b>	<b>-59.492617</b>	<b>-33.979563</b>	<b>5546885.95</b>	<b>6240455.14</b>	<b>22.77</b>
7	50.0	0.0	19.790	-59.492223	-33.979872	5546922.19	6240420.69	22.20
8	100.0	0.0	19.510	-59.491829	-33.980181	5546958.42	6240386.23	21.92
9	150.0	0.0	18.810	-59.491435	-33.980490	5546994.66	6240351.78	21.22
10	200.0	0.0	17.900	-59.491041	-33.980799	5547030.89	6240317.33	20.31
11	250.0	0.0	17.010	-59.490647	-33.981108	5547067.13	6240282.87	19.42
12	300.0	0.0	15.530	-59.490253	-33.981417	5547103.36	6240248.42	17.94

\* el PT 6 corresponde a la intersección de los ejes XY. Sus coordenadas geográficas en longitud y latitud fueron calculadas en terreno con GPS Garmin MAP64S, en tanto que la altitud se estableció tomando la cota del MDE oficial del IGM para ese punto.

**Figura 2. Ejemplos de PCT materializados en el terreno. De derecha a izquierda PT3, PT4 y PT5.**



### Adquisición de imágenes - planificación del vuelo

Para la planificación del vuelo se utilizó la aplicación Pix4DCapture. Se trata de una aplicación gratuita, compatible con los VANT marca Parrot y apta para móviles Android, por lo que resulta adecuada para nuestro equipamiento. El diseño del plan de vuelo utilizado fue el rectangular (GRID MISSION) del tipo 2D que corresponde a la rejilla simple<sup>2</sup>.

Se realizó una misión de vuelo que cubrió una superficie de 20 has., teniendo en cuenta que el lote de interés ocupa una superficie de 16 hs. pero que es necesario registrar también un excedente en todas las direcciones para evitar problemas de falta de superposición de imágenes. La altura de vuelo seleccionada fue de 50 m sobre la superficie, correspondiente a una resolución espacial teórica de 1,67 cm/píxel. (Figura 3). Se estableció así un total de 18 líneas de vuelo, con un traslape frontal de 80% y lateral de 72%<sup>3</sup>, un ángulo de incidencia de cámara vertical (90°) y velocidad media. Se estimó de este modo una duración de la misión de 42 minutos, lo que significa el consumo tres baterías durante la misión.

Con esta configuración se obtuvieron 703 imágenes, las cuales se utilizaron para generar los MDE a partir del proceso de restitución fotogramétrica.

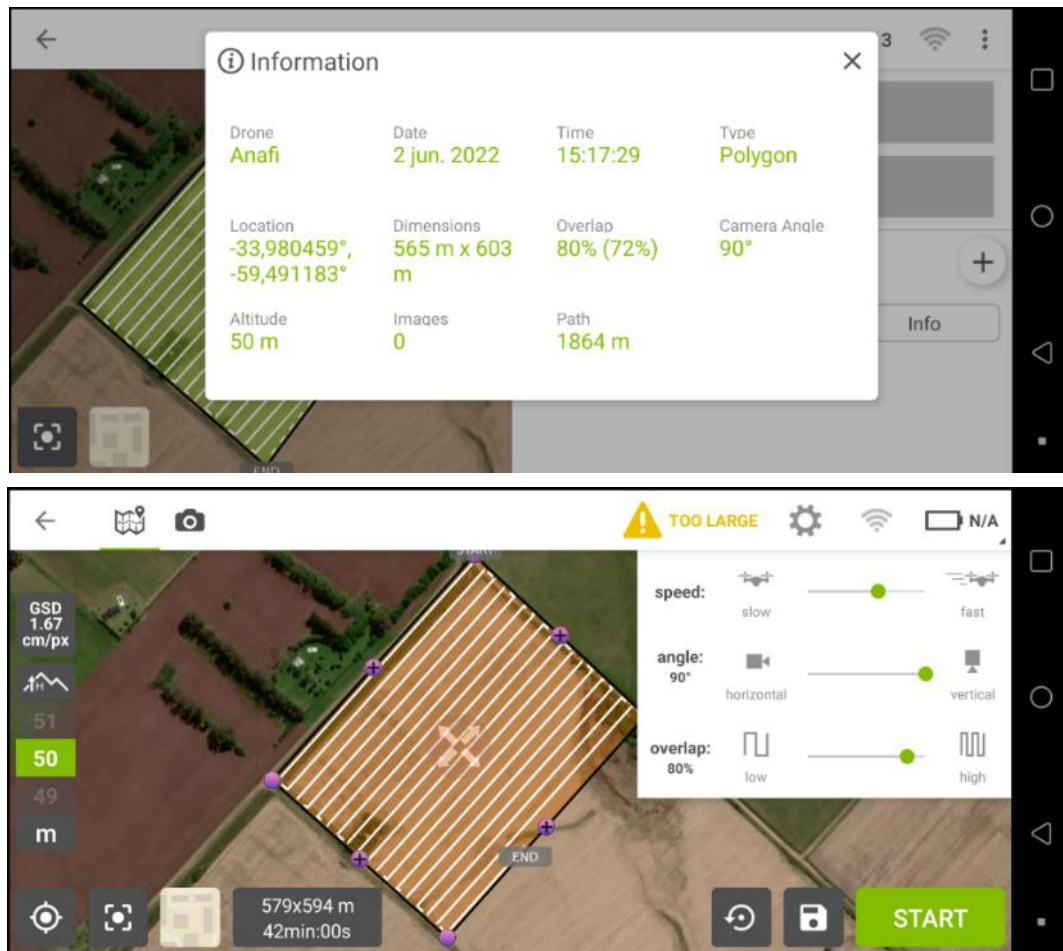
### Restitución fotogramétrica

El programa utilizado fue Agisoft Metashape Professional versión 1.6.4. Se generaron dos series de restituciones fotogramétricas. La primera serie, basándonos en la localización GPS convencional de cada uno de los fotogramas provista por el VANT al momento de la realización del vuelo programado. La segunda serie de productos se realizó tomando en consideración como Puntos de Apoyo Fotogramétrico, aquellos puntos de control terrestre (PCT) que habían sido colocados en el área previo al vuelo. De este modo, se generaron dos Modelos de Elevación Digital (MDE) a partir de los cuales se generaron curvas de nivel como producto derivado.

<sup>2</sup> Para obtener solo el modelo digital de elevaciones (MDE) o la ortofoto de una superficie de terreno se recomienda utilizar la rejilla simple ya que es más rápido en cuanto a la toma de datos y el proceso posterior. Si por el contrario se quiere obtener elementos con un desarrollo vertical importante se empleará la misión de doble rejilla.

<sup>3</sup> De acuerdo a Jimenez-Jimenez et al. (2017), las imágenes deben tomarse casi paralelas y con un traslape frontal y lateral superior al 60 % (Agisoft, 2016), aunque diversos autores han tenido resultados **satisfactorios** en la generación de modelos digitales con fines topográficos con traslapes superiores a 70 % (Eisenbeiss, Lambers, Sauerbier, & Li, 2005; Haala et al., 2013; Lucieer, Jong, & Turner, 2014).

**Figura 3. Detalles de la Misión de Vuelo programado para el presente trabajo utilizando Pix4D Capture en un teléfono celular marca LG K61 con Sistema Operativo Android v.11.**



El modelo de flujo utilizado para la restitución se tomó del Manual de Usuario de Agisoft (2020), y Zafra Granados (2018)

La computadora utilizada fue una laptop ASUS de 16 GB de memoria RAM con procesador Intel Core i7 Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz y GPU(s) GeForce 940MX y Intel(R) HD Graphics 620.

### Estimación de la precisión

La estimación de la precisión de los productos fotogramétricos (MDE y Fotomosaico/Orthofoto) se realizó siguiendo la propuesta de Jimenez-Jimenez et al. (2017) que consiste en el cálculo de los errores estadísticos entre las coordenadas de los PCT y las coordenadas de puntos homólogos considerados en cada uno de los dos modelos. También se realizó análisis visual de las imágenes como apoyo a la interpretación.

De este modo se calcularon cuatro parámetros estadísticos de error (Ecuaciones 1 a 4) que se detallan en la Figura 4: el error medio (EM), la raíz del cuadrado medio del error (RCME), la desviación estándar de los errores (DEE) y el error absoluto máximo (Emáx). Los mencionados autores refieren que el EM es una medida de precisión de los datos que indica cualquier error sistemático positivo o negativo, la RCME es una medida de dispersión de la distribución de

frecuencias de los residuales que es sensible a grandes errores, la DEE proporciona información sobre la precisión y distribución de los residuos alrededor de la media y el  $E_{\max}$  describe el residual mayor presente para la comprensión de los límites de la calidad de los datos (Willmott & Matsuura, 2005). Los residuales ( $C_{cal}-C_{obs}$ ) en el eje de altitud se calcularon como la diferencia entre las mediciones extraídas de los MDE y las tomadas con el Nivel óptico en el plano Z. Los valores positivos indican sobreestimación de datos del MDE, y los negativos, subestimación de datos.

**Figura 4: Formulas de las ecuaciones 1 a 4 utilizadas para estimar la precisión de los modelos (tomado de Jimenez-Jimenez et al. (2017)).**

$$EM = \frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})}{n} \quad (1)$$

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})^2}{n}} \quad (2)$$

$$DEE = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(C_{cal} - C_{obs}) - EM]^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$E_{max} = \max |C_{cal} - C_{obs}| \quad (4)$$

Dónde:  $C_{cal}$  = coordenadas z extraídas de los MDE en los PCT homólogos y  $C_{obs}$  = coordenadas de los PV medidas con el Nivel Óptico.

Cabe destacar que la DEE de eje Z no debe entenderse como el error máximo del MDE en ese eje, sino como un indicador del error global. Asumiendo una distribución normal de los errores, el 68.27 % de los mismos se encuentran por debajo de la DEE indicada, 95.45 % por debajo de dos veces la DEE y 99.76 % por debajo de tres veces la DEE.

### Producción Cartográfica

Se realizó interpretación visual de imágenes para comparar los productos obtenidos. A partir de los MDE se elaboró el mapa de sombras y una capa curvas de nivel de 0,5 m de equidistancia como productos derivados. Con las capas de MDE, curvas de nivel, y orthofoto se generaron diversos mapas utilizando QGIS. Se analizó también el impacto de los errores fotogramétricos en distintas escalas cartográficas para definir la significancia de los mismos en el producto final.

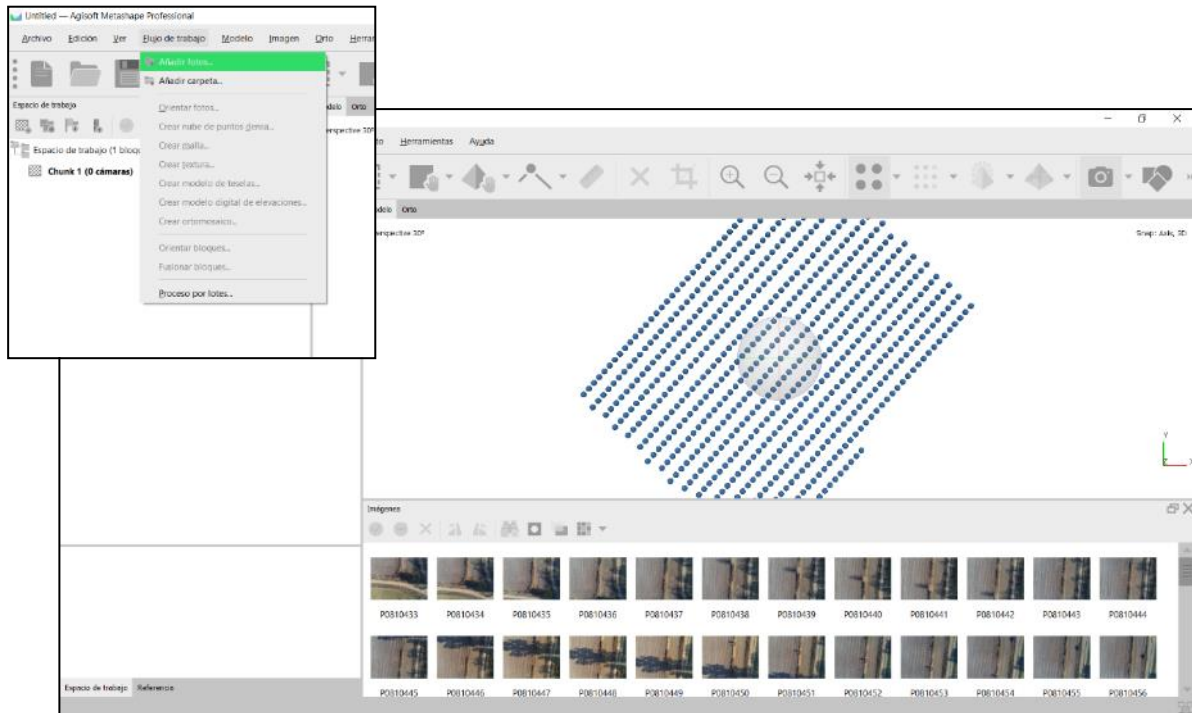
## RESULTADOS

Se presentan en primer lugar los resultados de cada una de las etapas del procesamiento de las fotografías para la obtención del MDE y Fotomosaicos. En primer término, se expone la secuencia de trabajo utilizando sólo los puntos del navegador GPS del drone ANAFI. En segundo término se exponen los resultados del proceso aplicando los Puntos de Apoyo Fotogramétrico. En tercer lugar se cuantifica la precisión de ambos modelos y se analizan las ventajas y limitaciones de cada uno. Finalmente, se presenta la cartografía.

### Modelo 1 - Restitución fotogramétrica sin Puntos de Apoyo Fotogramétrico

*Paso 1: Añadir Fotos.* Se incorporaron las 703 imágenes que fueron tomadas durante el plan de vuelo. Se observan 16,5 filas de puntos que corresponden a los centroides de cada fotograma, cuya posición fue estimada por el programa en base a la localización GPS del drone al momento de la captura de la foto. Nótese que la diferencia entre el plan de vuelo, que preveía la realización de 18 filas y el resultado obtenido, se debe a la menor duración de las baterías durante el trabajo de campo, lo que produjo la reducción del área de vuelo que nos proponíamos relevar (Figura 5).

**Figura 5. Detalle de la localización del comando “Añadir Fotos” en Agisoft, y centroides de las 703 imágenes capturadas durante a nuestro plan de vuelo.**

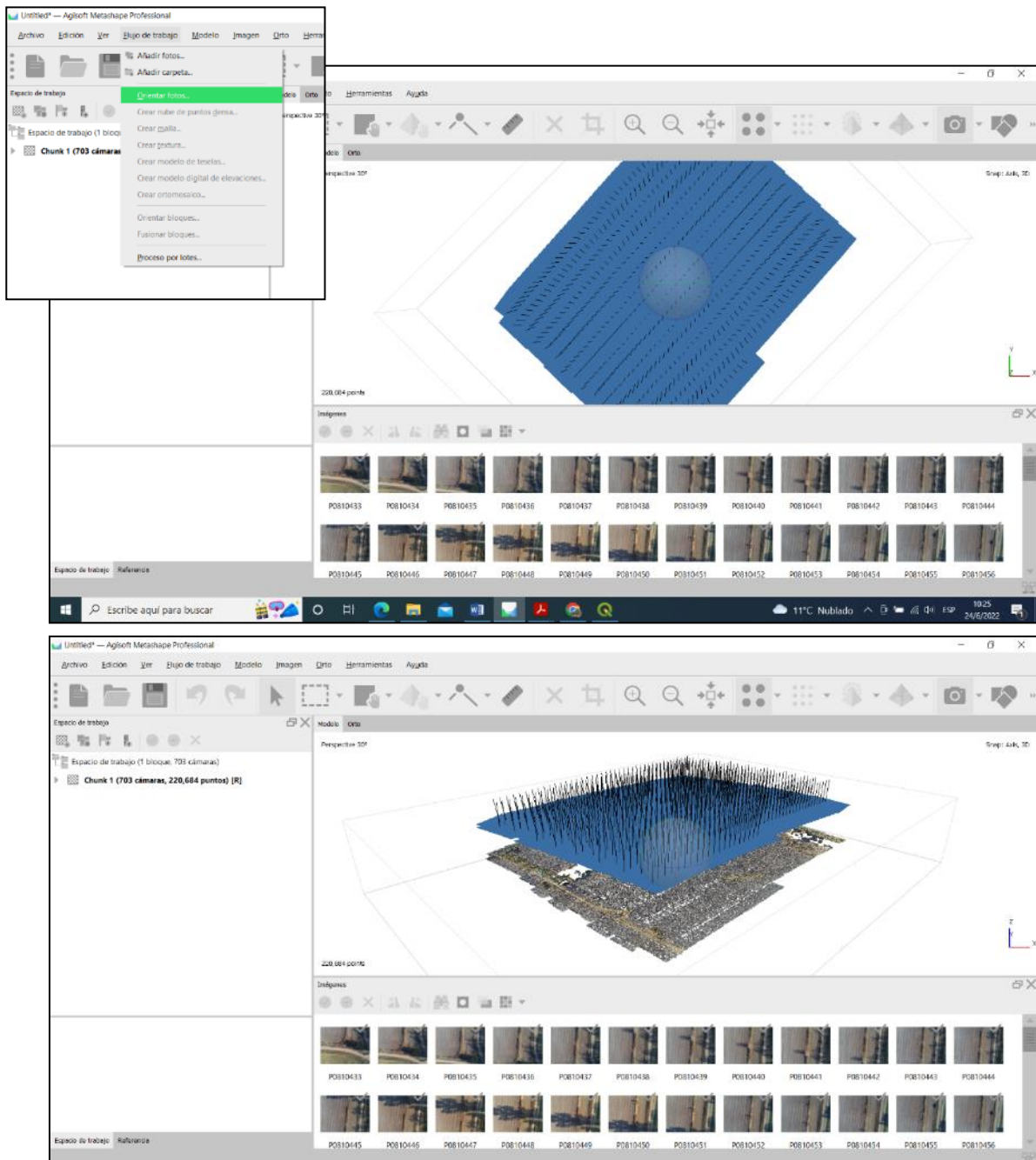


*Paso 2: Orientar Fotos.* En esta etapa, el programa busca puntos coincidentes entre imágenes superpuestas, calcula la posición de la cámara para cada foto y crea un modelo de **nube de puntos dispersos** en tres dimensiones. En nuestro caso, se detectaron 220.684 puntos de paso (Figura 6). Las posiciones y orientaciones de la cámara se indican mediante rectángulos azules en la ventana de visualización.

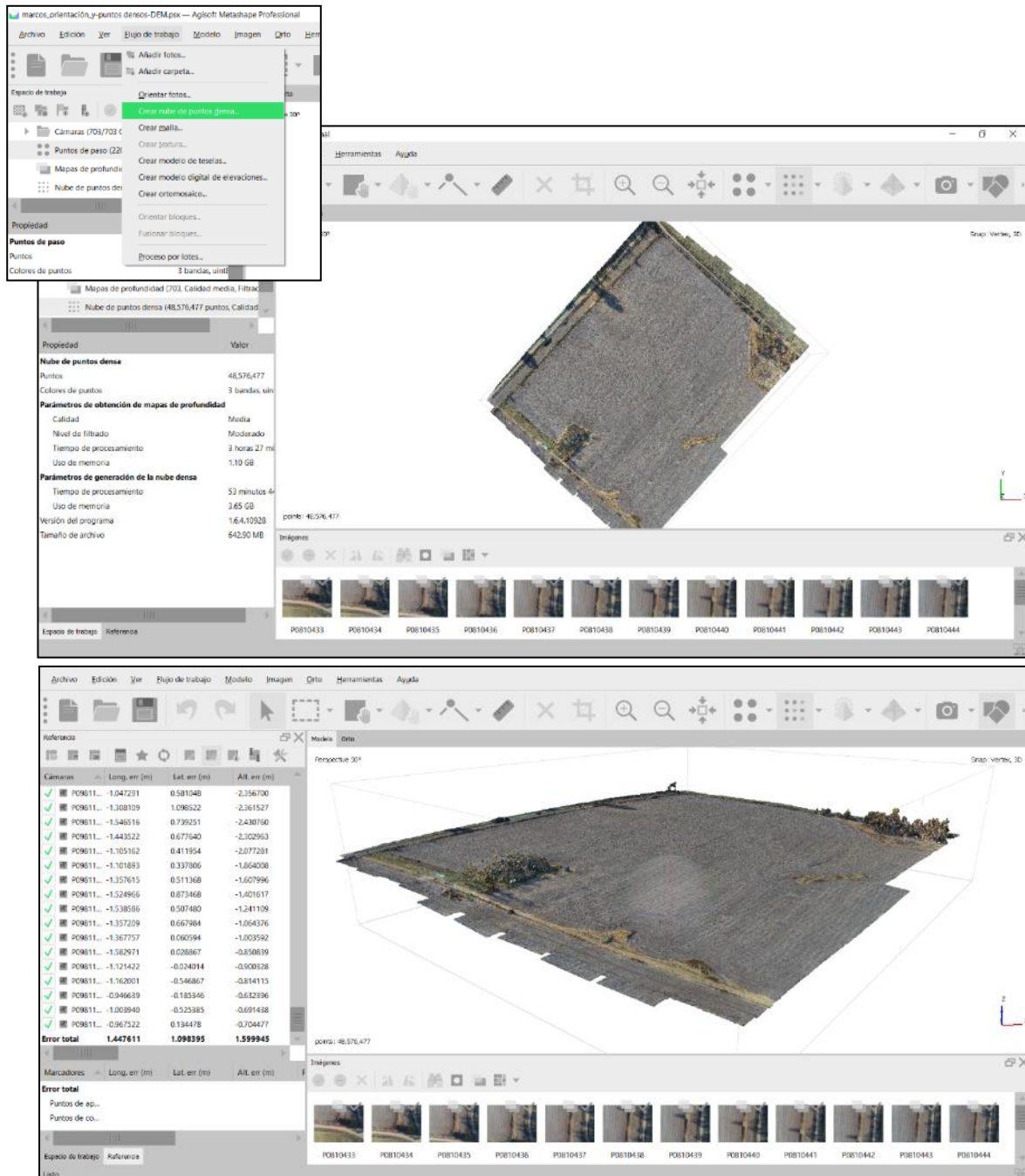
*Paso 3: Crear Nube de Puntos Densa.* Con base en las posiciones estimadas de la cámara que se realizó en el Paso 2, el programa calcula la información de profundidad para cada cámara que se combinan en un solo punto de enturbiamiento denso. En nuestro procesamiento, que configuramos en “Calidad Media” y “Nivel del Filtrado Moderado”, la nube resultante tiene un total de 48.576.477 puntos (Figura 7).



Figura 6. Detalle de la localización del comando “Orientar Fotos” en Agisoft, y nube de puntos dispersos con detalle del campo de cada imagen.



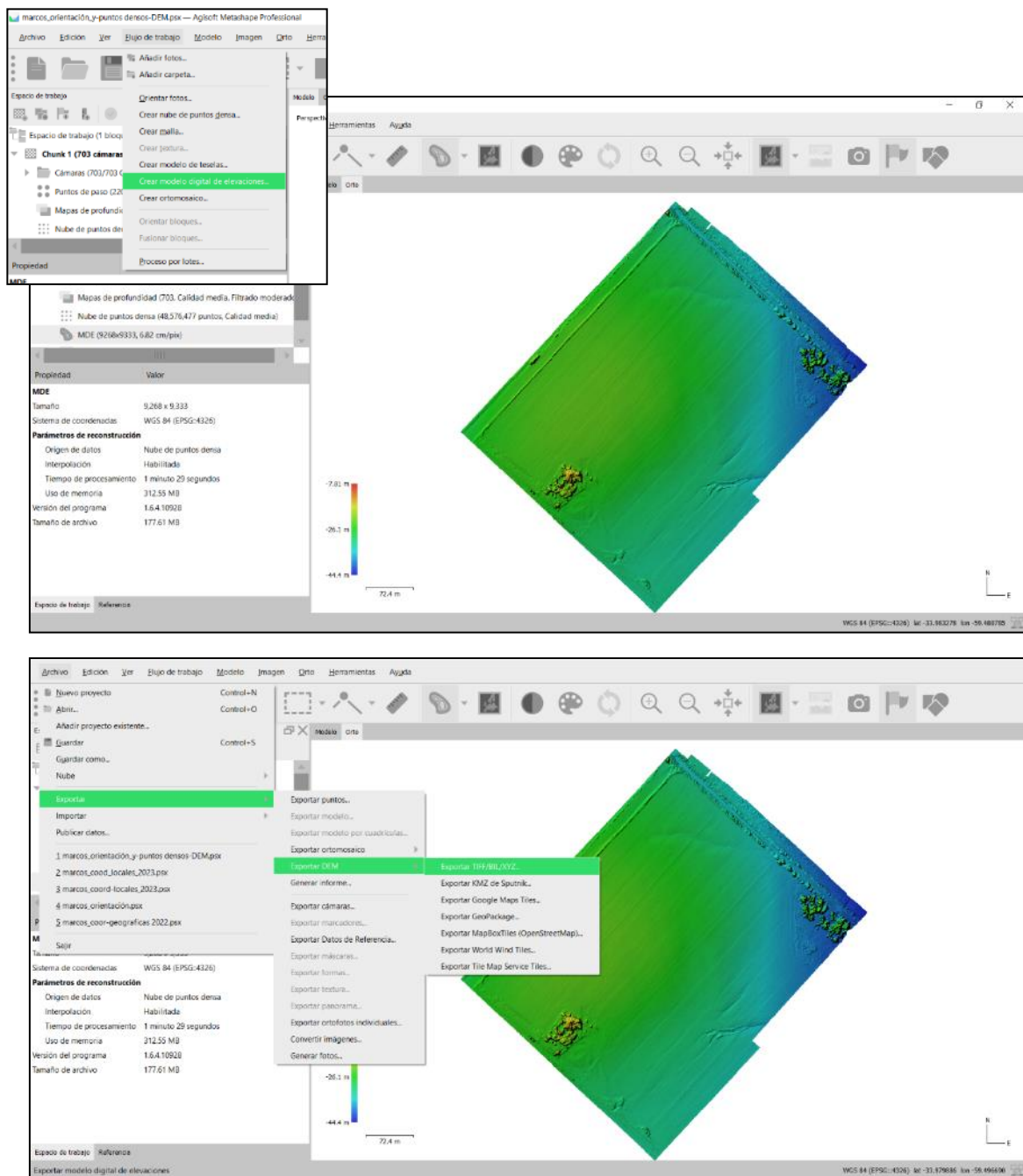
**Figura 7. Detalle de la localización del comando “Crear nube de puntos densa Fotos” en Agisoft, y nube de puntos densa correspondiente a nuestro caso de estudio en vista vertical (arriba) y en perspectiva (abajo). Nótese la diferencia entre el error medio (EM) en X, Y y Z calculado en base al dato GPS de cada uno de los fotogramas.**



**Paso 4: Crear modelo digital de elevaciones.** En esta instancia se genera el Modelo de Elevación Digital, tomando como insumo la nube de puntos densa generada en el paso anterior. En nuestro caso, se obtuvo un producto que tiene una Resolución de 6.82 cm/pix y una Densidad de puntos de 215 puntos/m<sup>2</sup> (Figura 8). Nótese en el rango de mayor y menor altitud, que van del -7,81 a -44,44 m. Esto será luego se ajustado con los datos de altitud referidos por el IGN para el área de estudio, para equiparar con los datos.

En este punto también se exportó el Modelo al formato GeoTIFF, para su utilización que QGIS. El producto fue exportado además en sistema de coordenadas POSGAR 2007 Faja 5.

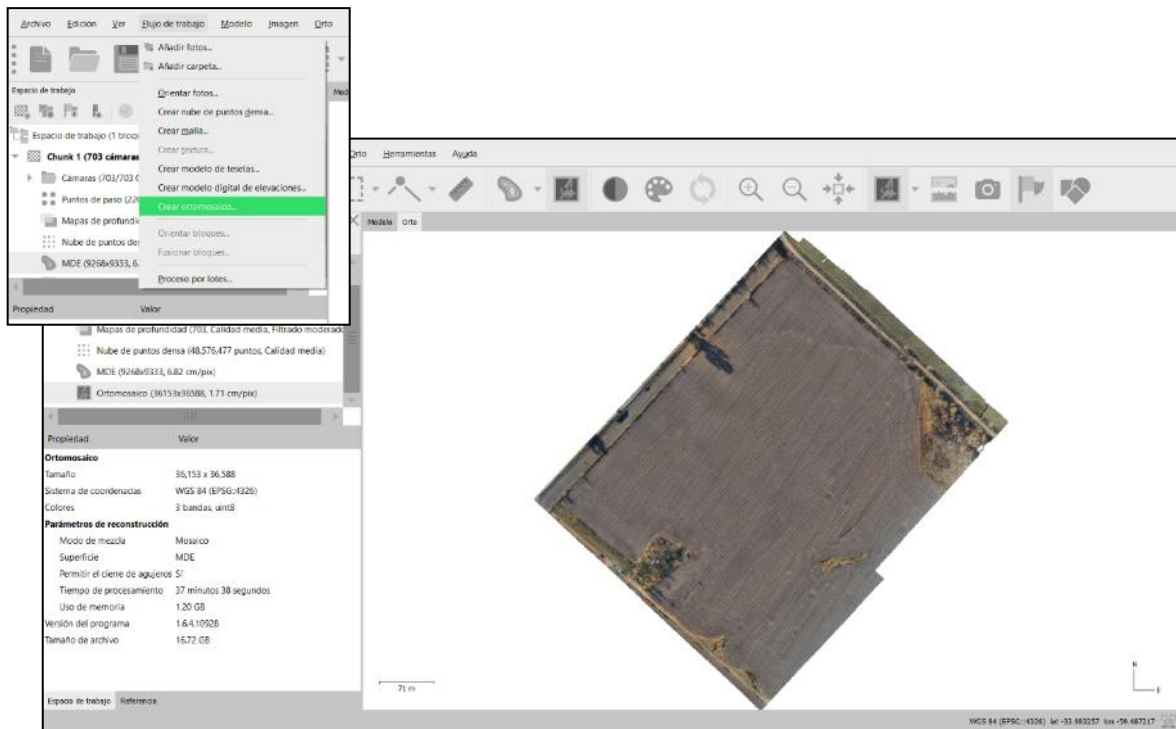
**Figura 8. Detalle de la localización del comando “Crear modelo digital de elevaciones” en Agisoft, Modelo de Elevación Digital (MDE) correspondiente a nuestro caso de estudio, y detalle de la localización del comando de exportación del modelo en formato GeoTIFF.**



*Paso 5: Crear ortomosaico.* Como último paso se genera el fotomosaico (u ortomosaico), basado tanto en el MDE como en el Nube de puntos densa. En nuestro caso de estudio se obtiene un mosaico de 1,71 cm/pix (Figura 9).

En esta instancia también se exportó el producto al formato GeoTIFF en sistema de coordenadas POSGAR 2007 Faja 5 para su utilización en QGIS.

**Figura 9. Detalle de la localización del comando “Crear ortomosaico” en Agisoft, fotomosaico correspondiente a nuestro caso de estudio.**



## Modelo 2 - Restitución fotogramétrica con Puntos de Apoyo Fotogramétrico

En este caso se iguala la realización de los Pasos 1 (*Añadir fotos*), 2 (*Orientar fotos*) y 3 (*Crear nuevo de puntos densa*), de modo que detallaremos únicamente los pasos subsiguientes.

*Paso 4: Colocar marcadores.* En esta instancia se incorpora en primer lugar el archivo con los datos XYZ de los puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), con la opción “Importar Referencia”. Luego se ajusta la localización de los puntos en cada una de las fotos con la opción “Filtrar fotos por marcadores”, colocando la banderita verde exactamente en los los marcadores materializados (Figura 10). Como resultado se observará la ubicación de cada uno de los PAF en la nube de puntos.

**Figura 10. Colocación de PAF (Marcadores) durante el proceso de restitución fotogramétrica. Se muestra el comando para “importar marcadores”, la ventana de configuración de la tabla de entrada, y un ejemplo de localización del punto para cada uno de los 11 marcadores utilizados en este trabajo.**

The figure displays the software interface for importing ground control points (GCPs) into a photogrammetry workflow. It includes a dialog box for file import, a table for configuring the GCP data, and a series of images showing the markers in their respective locations on the terrain.

**Importar desde archivo de texto**

General de coordenadas  
 WGS 84 (1955-4750)  
 Ángulo de rotación: Definido, lateral, exterior  
 Ignorar el centro

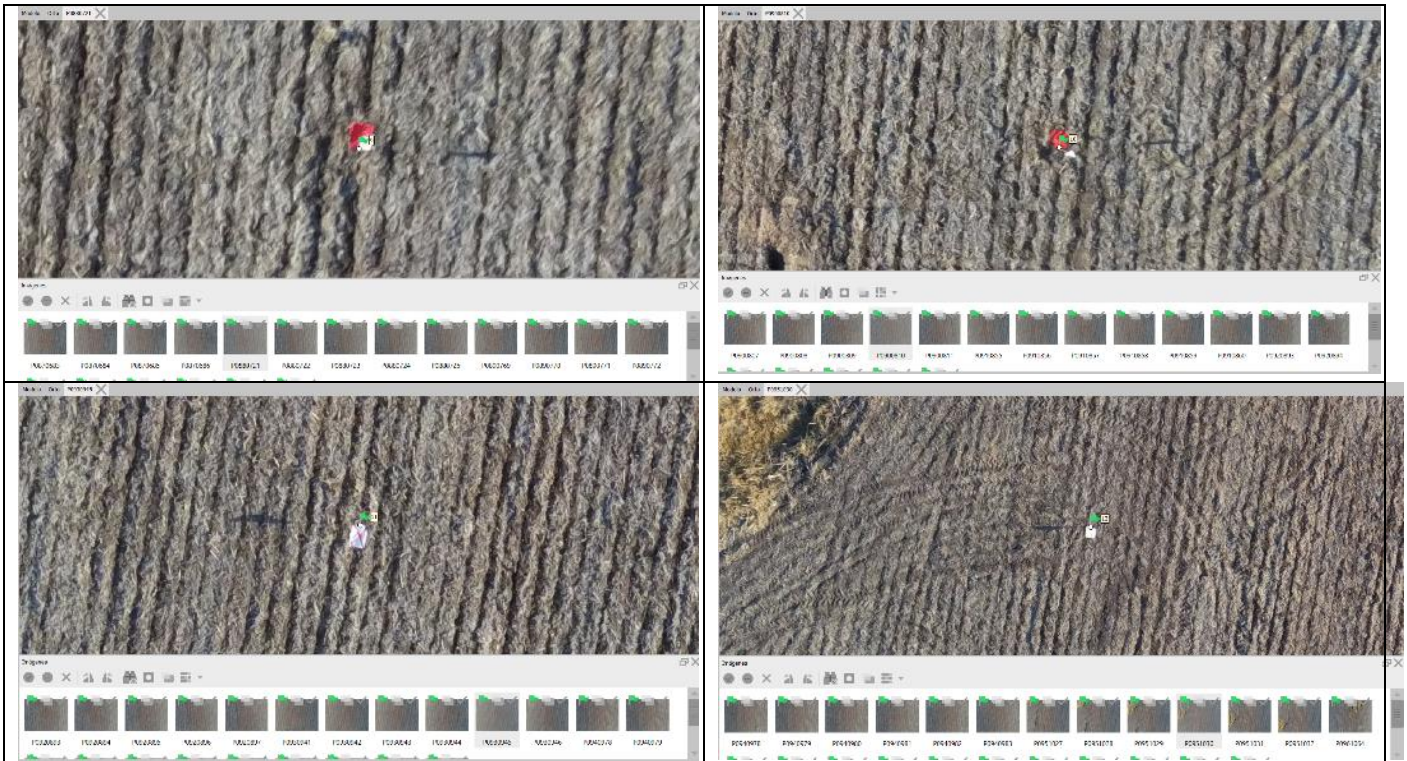
Definición de columnas  
 Columnas: Etiqueta: 1, Precisión:  Rotación:  Precisión:   
 Longitud: 4, 0, Geoida/Elm: 12, 9  
 Latitud: 5, 0, Geoida/Elm: 12, 9  
 Altitud: 3, 0, Altim: 15, 9  
 Tipo de marcador:  Tipo de marcador: 10

Conexión e importar en: 1  
 Ver un ejemplo de los formatos de fichero

ID	Altitud	altura cor.	Longitud	Latitud
1	18,170	20,58	59,49,133	33,97,8251
2	18,600	21,01	59,49,134	33,97,8259
3	18,120	21,58	59,49,135	33,97,8257
4	19,830	22,21	59,49,136	33,97,8255
5	20,300	22,77	59,49,137	33,97,9058
6	18,700	23,20	59,49,223	33,97,9872
7	18,210	23,57	59,49,138	33,97,8253
8	18,870	23,22	59,49,139	33,97,8250
9	17,900	20,81	59,49,140	33,98,0759
10	17,010	19,42	59,49,047	33,98,1128

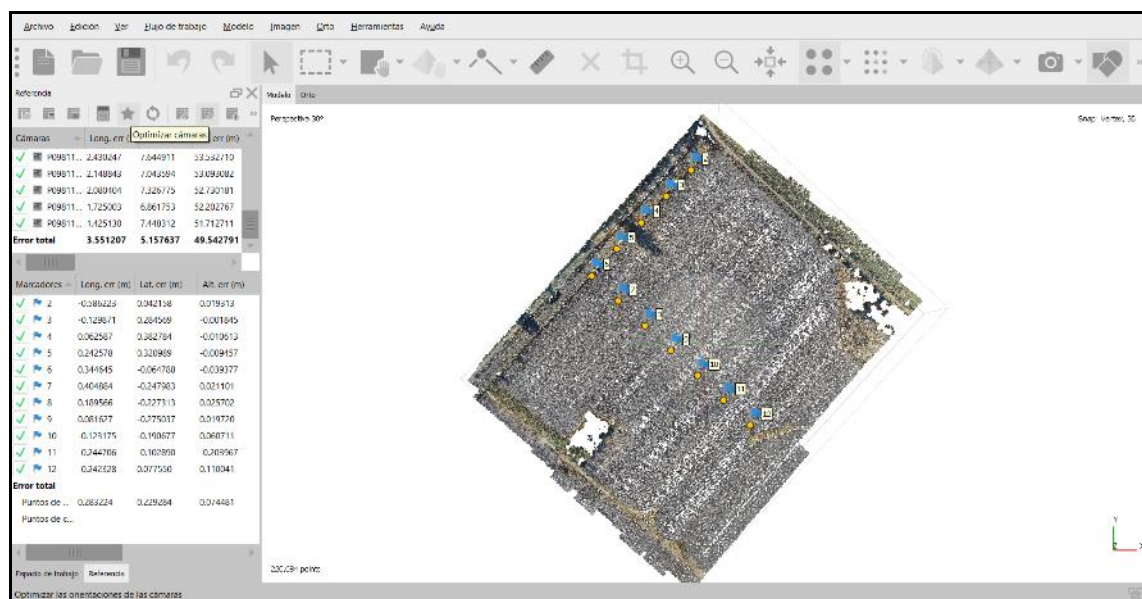
**Errores totales**  
 Puntos de esp...  
 Puntos de co...

The figure also shows 11 individual images, each with a marker placed on a specific point on the terrain, corresponding to the data in the table above.



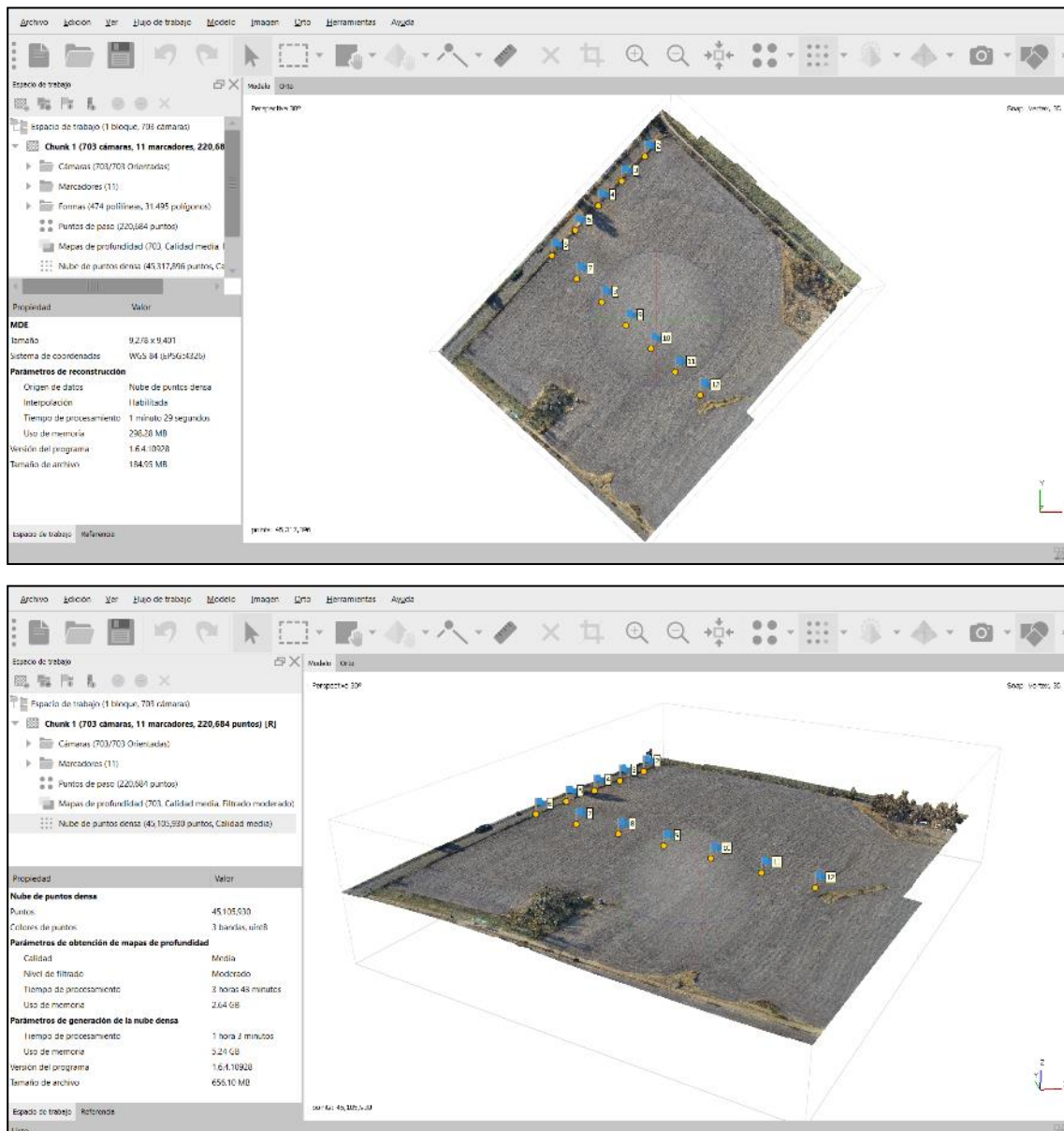
*Paso 5: Optimizar cámaras.* En este paso, el sistema calcula nuevamente la posición de las cámaras (fotos) en base al ajuste indicado con la colocación de PAF (Figura 11).

**Figura 11.** Detalle de la localización del comando “Optimizar cámaras” en Agisoft, y nube de puntos con la localización de los 11 puntos de apoyo fotogramétrico (PAF) correspondientes a nuestro caso de estudio. Se observa asimismo la diferencia entre el error medio (EM) en X, Y y Z calculado en base al dato GPS de cada uno de los fotogramas, y el error medio (EM) tras la colocación de los PAF.



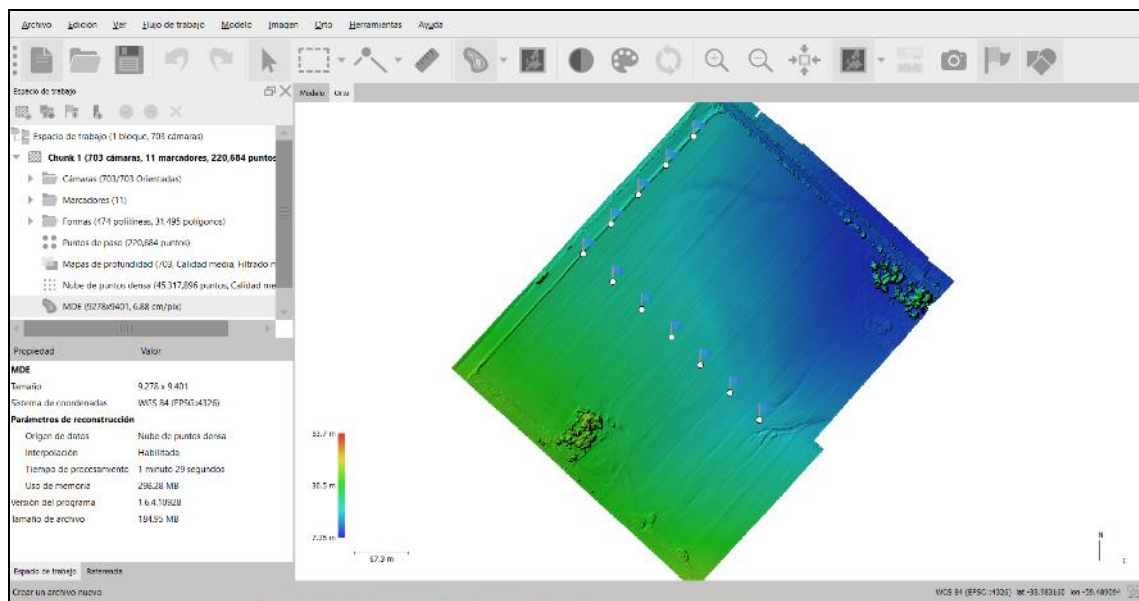
Paso 6: *Generar nube de puntos densa*. Luego de la orientación de cámaras se debe generar una nueva nube de puntos densa, utilizando el mismo comando descrito en el Paso 3. En este procesamiento, que configuramos también en “Calidad Media” y “Nivel del Filtrado Moderado”, la nube resultante tiene un total de 45.317.896 puntos (Figura 12).

**Figura 12.** Vista vertical (arriba) y en perspectiva (abajo) de la nube de puntos densa correspondiente a nuestro caso de estudio, con indicación de la ubicación de los PAF.



**Paso 7 Crear modelo digital de elevaciones.** En esta instancia se genera el Modelo de Elevación Digital, tomando como insumo la nube de puntos densa generada en el paso anterior. En nuestro caso, se obtuvo un producto que tiene una Resolución de 6.88 cm/pix cm/pix y una Densidad de puntos de 215 puntos puntos/m<sup>2</sup>. Nótese en el rango de mayor y menor altitud, que van de 7,25 a 53,7 m (Figura 13). En este punto también se exportó el Modelo al formato GeoTIFF, para su utilización que QGIS. El producto fue exportado además en sistema de coordenadas POSGAR 2007 Faja 5, utilizando el mismo procedimiento detallado en la serie anterior.

**Figura 13. Modelo Digital de Elevaciones construido utilizando PAF.**

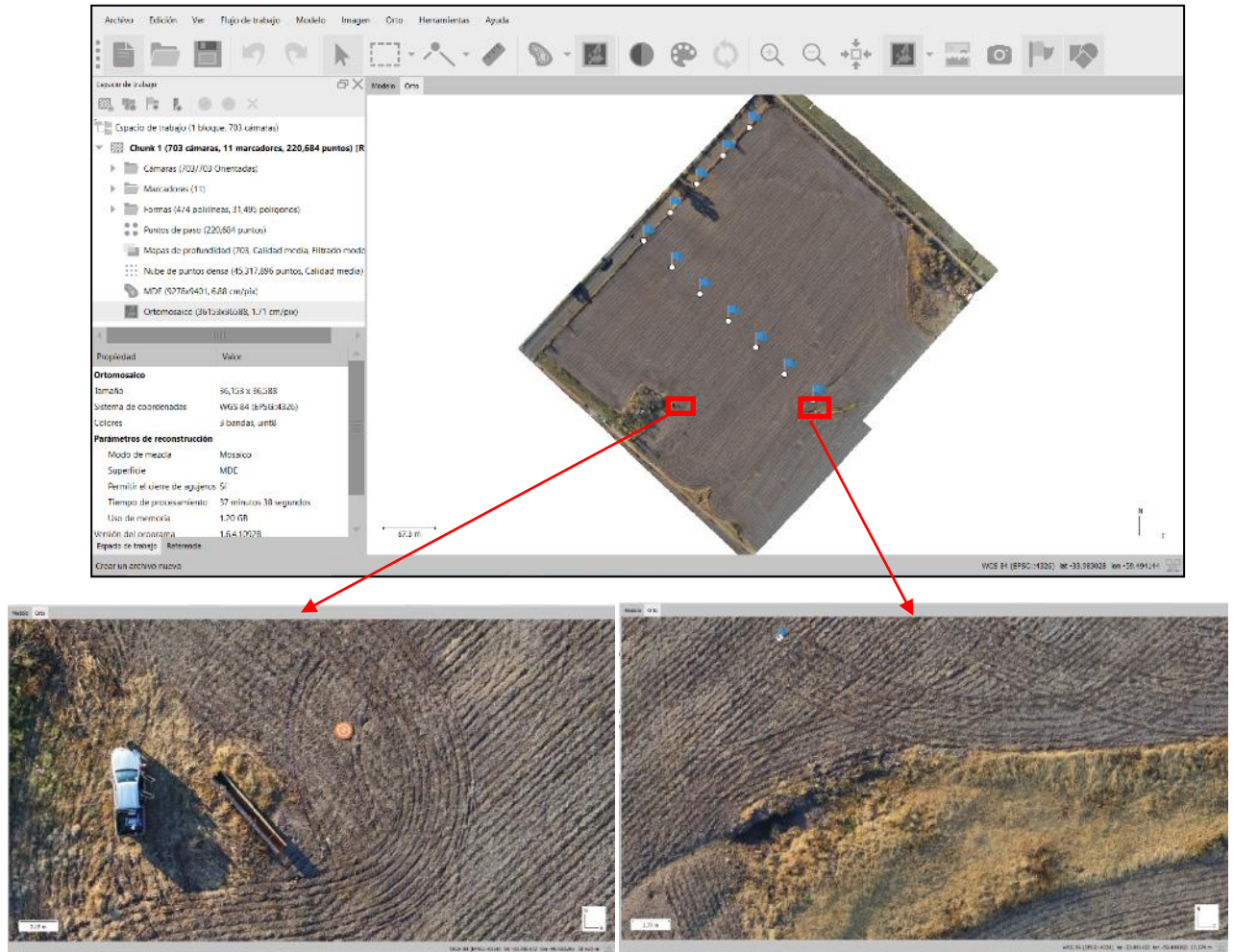


**Paso 8: Crear ortomosaico.** Nuevamente, como último paso se genera el fotomosaico (u orthomosaico), basado tanto en el MDE como en el Nube de puntos densa. En este caso se obtuvo un mosaico de 1,71 cm/pix. (Figura 14).

También se exportó el producto al formato GeoTIFF en sistema de coordenadas POSGAR 2007 Faja 5 para su utilización en QGIS.



**Figura 14. Fotomosaico correspondiente a nuestro caso de estudio, con la localización de los PAF, y detalles con ampliaciones que permiten observar la resolución del producto.**



Estimación de la precisión

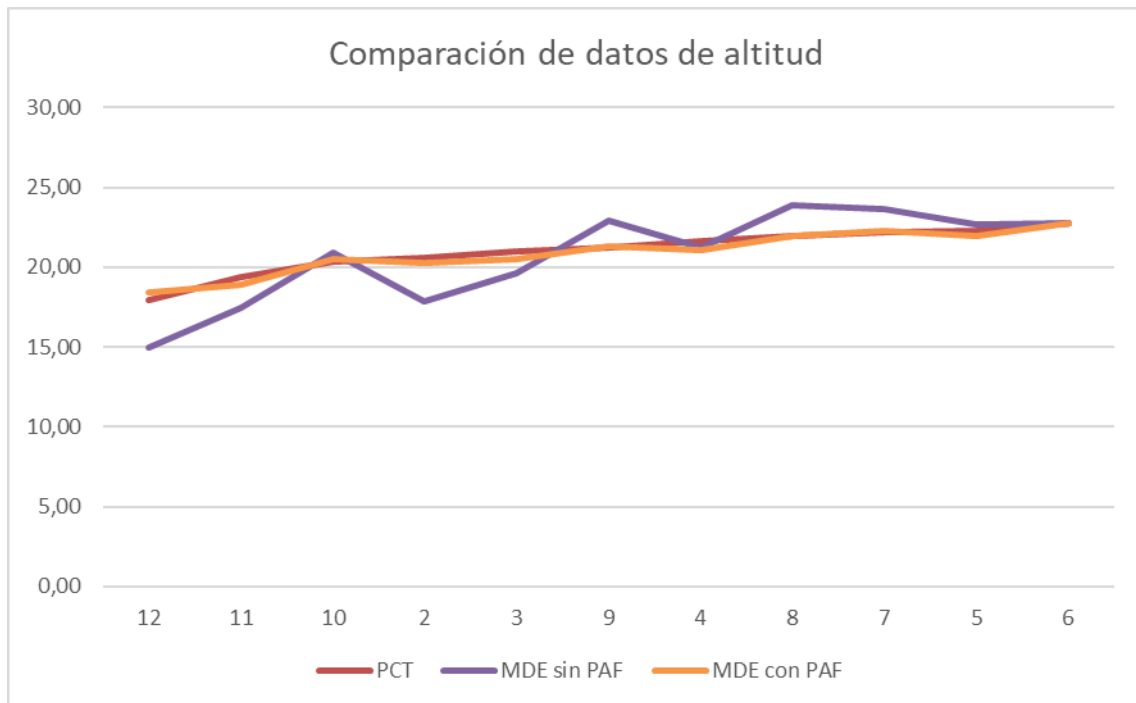
En este apartado se presenta en primer lugar una comparación entre los datos de altitud generados a partir de las tres metodologías de registro, a saber: PCT medidos con nivel óptico, MDE elaborado con Agisoft sin puntos de control y MDE elaborado con Agisoft con PAF. Los resultados se presentan en la Tabla 2 y se ilustra en la Figura 15.

**Tabla 2. Datos de altitud de los Puntos de Control en el Terreno generados a partir de las tres metodologías de registro.**

Punto N° (PT)	Altitud PCT (msnm)	Altitud MDE sin PAF (msnm)		Altitud MDE con PAF (msnm)
		Según Agisoft	Corregido por MDE IGN	
12	17.94	-31.33	14.990	18.414
11	19.42	-28.87	17.450	18.934

10	20.31	-25.42	20.900	20.518
2	20.58	-28.44	17.880	20.236
3	21.01	-26.73	19.590	20.476
9	21.22	-23.43	22.890	21.314
4	21.60	-25.1	21.220	21.103
8	21.92	-22.43	23.890	21.958
7	22.20	-22.66	23.660	22.256
5	22.24	-23.67	22.650	21.985
6	22.77	-23.55	22.770	22.752

Figura 15: Gráfico de dispersión que compara las diferencias en los datos de altitud en los Puntos de Control del Terreno, generados a partir de las tres metodologías de registro: Nivel óptico, MDE sin PAF y MDF con PAF.



Ordenando los datos de menor a mayor se puede observar que las tres curvas siguen la misma tendencia general, aunque con fluctuaciones mas marcadas en el caso del MDE sin puntos de control, respecto al MDE elaborado con PAF. Esta última curva sigue muy de cerca la curva de datos relevados con el nivel óptico.

Para cuantificar estas diferencias se presentan en la Tabla 3 los resultados de las 4 ecuaciones desarrolladas en la metodología.

**Tabla 3. Cálculos realizados para estimar los errores de los modelos fotogramétricos en base a las ecuaciones estadísticas.**

id	Altitud PCT (Nivel Optico) (C obs)	Altitud MDE sin PAF (C cal1)	Altitud MDE con PAF (C cal2)	C cal1 - C obs	C cal2 - C obs	RCME cal1 $(\frac{Ccal1 - Cobs}{2})$	RCME cal2 $(\frac{Ccal2 - Cobs}{2})$	DEE cal1 $[\frac{Ccal1 - Cobs}{EM}]^2$	DEE cal2 $[\frac{Ccal2 - Cobs}{EM}]^2$
2	20.58	17.88	20.236	-2.70	-0.34	7.290	0.118	5.751	0.052
3	21.01	19.59	20.476	-1.42	-0.53	2.016	0.285	1.250	0.176
4	21.60	21.22	21.103	-0.38	-0.50	0.144	0.247	0.006	0.146
5	22.24	22.65	21.985	0.41	-0.25	0.168	0.065	0.507	0.020
6	22.77	22.77	22.752	0.00	-0.02	0.000	0.000	0.091	0.009
7	22.20	23.66	22.256	1.46	0.06	2.132	0.003	3.104	0.029
8	21.92	23.89	21.958	1.97	0.04	3.881	0.001	5.161	0.023
9	21.22	22.89	21.314	1.67	0.09	2.789	0.009	3.888	0.044
10	20.31	20.90	20.518	0.59	0.21	0.348	0.043	0.795	0.104
11	19.42	17.45	18.934	-1.97	-0.49	3.881	0.236	2.783	0.138
12	17.94	14.99	18.414	-2.95	0.47	8.703	0.225	7.013	0.347
Sumatoria				-3.32	-1.26	31.352	1.233	30.350	1.088
<b>EM</b>				<b>-0.30</b>	<b>-0.11</b>				
<b>RCME</b>						<b>1.688</b>	<b>0.335</b>		
<b>DEE</b>								<b>1.742</b>	<b>0.330</b>
<b>Error máximo</b>				<b>-2.95</b>	<b>-0.49</b>				

De este modo se observa que el **EM** en altitud del Modelo 1 es de -30 cm, en tanto que el EM del Modelo 2 es de -11 cm. Ambos modelos subestimaron levemente el relieve, tomando en consideración los datos relevados con Nivel óptico, aunque el Modelo 2 muestra una diferencia menos marcada. Otra observación que se desprende es que la diferencia en altitud entre los modelos generados con y sin PAF es de 20 cm.

En los análisis con la **RCME** se encontró una mayor diferencia entre ambos modelos, siendo de 1,688m en Modelo 1 y 0,335m en el Modelo 2. El dato es relevante por cuando por definición, la RCME, en comparación con el EM, amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud.

Por otro lado la **DEE** indica que la precisión en altitud en el Modelo 1 es a 1,742m en el 68,27% de las 19has relevadas y 3,484 m en el 95,45% de la superficie, en tanto que para el Modelo 2, la precisión en altitud es de 0,33 m en el 68,27% de la superficie relevada y de 0,66 m en el 95,45% de la superficie relevada. Nuevamente se observa la mayor exactitud del Modelo 2 respecto al Modelo 1.

El **Error máximo**, al igual que los demás estimadores, fue mayor en el Modelo 1 que en el Modelo 2. En este caso la diferencia entre ambos modelos es de 0,31 cm.

El Modelo 1 tiene un RCME de 1,688, lo que representa 24 veces la resolución del MDE. En cambio, el Modelo 2 tiene un RCME de 0,335, lo que representa sólo 4 veces la resolución del MDE. Este valor se corresponde con los umbrales aceptados como de alta precisión por Jiménez-Jiménez et al. (2017).

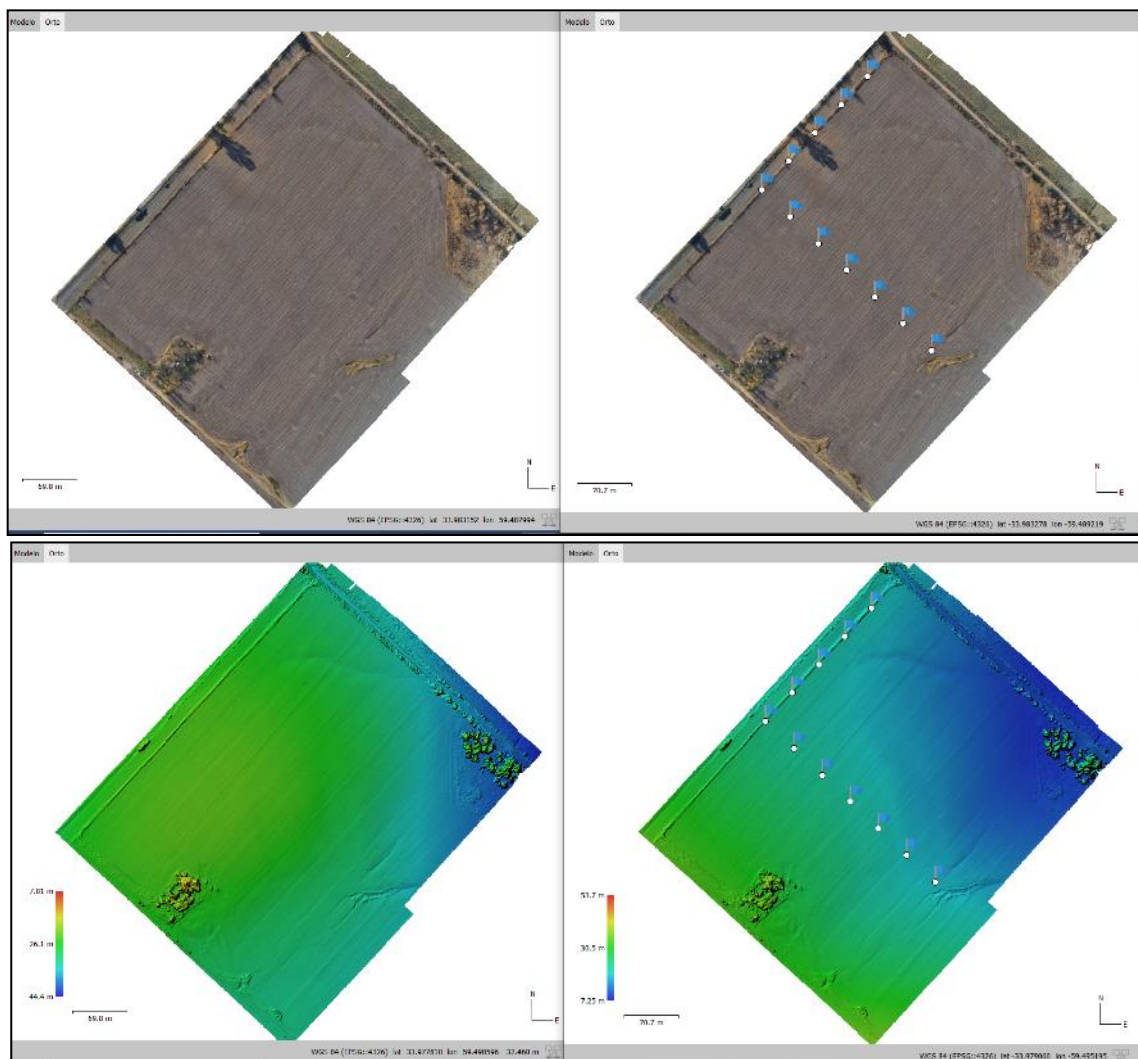
Sin síntesis, a nivel global se podría señalar que los resultados muestran un mayor error en el Modelo 1 respecto al Modelo 2.

### Interpretación visual de los modelos

La comparación visual entre las orthofotos de los Modelos 1 y 2 muestra que ambos no presentan diferencias. Sin embargo, la comparación entre los Modelos Digitales de Elevación 1 y 2, sí presentan diferencias significativas. Esto se debe a que los PAF utilizados para la elaboración del Modelo 2 no fueron distribuidos uniformemente a lo largo de toda el área relevada. Hemos mostrado en el apartado anterior que la utilización de PAF reducen los errores de altitud en el proceso de restitución fotogramétrica, pero observamos aquí que la reducción del error se limita al área que circunda los puntos de control, puesto que los errores se magnifican a medida que nos alejamos de estos puntos.

Es por esto que si comparamos ambos MDE constatamos que el Modelo 2 presenta valores de altitud excesivamente altos en el sector sur y excesivamente bajos en el sector noreste del modelo, en coincidencia con la ausencia de puntos de control (Figura 16).

**Figura 16. Comparación entre Orthofotos y MDE elaborados sin PAF (a la izquierda) y con PAF (a la derecha). Se observa en el DEM del Modelo 2 que en los sectores sector sur y noreste magnifican los errores de altitud, sobreestimándolos y subestimándolos respectivamente.**



En síntesis, la interpretación visual de los dos MDE permite discriminar que el Modelo 1 presenta errores estadísticos mayores respecto al Modelo 2, y que estos errores se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda la superficie relevada. El Modelo 2 presenta menores grados de error, pero estos se limitan al área donde se emplazaron los puntos de control, en tanto que el resto de la superficie modelada presenta mayores deformaciones que el Modelo 1.

### **Elaboración de cartografía y cálculos de escala**

La observación anterior obliga a descartar el Modelo 2 para la elaboración de cartografía de precisión, para este caso de estudio. Desde esta perspectiva, se debería realizar un nuevo relevamiento, con una distribución de PAF homogénea a lo largo de todo el lote.

Respecto al Modelo 1, para descartar o corroborar su utilidad, se debe analizar qué tan significativo es el error estadístico en productos cartográficos elaborados a diferentes escalas. Por ejemplo: para cartografía elaborada en escala 1:1000, la representación cartográfica de una curva de nivel, que tendrá aproximadamente 1 mm de grosor, estará representando 1 metro del terreno. Significa que la representación cartográfica de la curva subsume tres veces el EM del Modelo 1 (el EM de dicho modelo es de 30 cm), y equivale prácticamente al valor del RCME de ese modelo. Es decir, los errores no son visibles a esta escala de representación (y menos aún a escalas menores) y por lo tanto harían factible la utilización de cartografía elaborada con estos insumos.

Para cartografía en escala 1:500, una curva de nivel de 1 mm representa 50 cm de terreno, y por lo tanto, también subsume el EM del Modelo 1. Para cartografías en mayor escala ya comenzarían a detectarse la desviación entre el modelo cartográfico y la realidad representada.

De esto se desprende que la utilidad del Modelo 1 depende para los propósitos para los cuales se utilizará la cartografía que se elabore con este insumo. El umbral de escala apropiada para este modelo es de 1:500. Esto significa, para un lote de 350x430 m, un mapa impreso en un tamaño de 90x70 cm. Todas las impresiones a menor tamaño están representando la realidad con errores despreciables, no visibles a la escala de representación.

Las figura 17 y 18 muestran las composiciones cartográficas derivadas del Modelo 1, a una escala de representación que hace despreciables los niveles de error estimados para el relevamiento realizado con el VANT.

Figura 17. Composiciones cartográficas de cada una de las capas elaboradas por fotogrametría. Arriba a la izquierda: Modelo Digital de Elevación; Arriba a la derecha: sombras; Abajo a la izquierda: Orthofoto; Abajo a la derecha: Curvas de nivel.

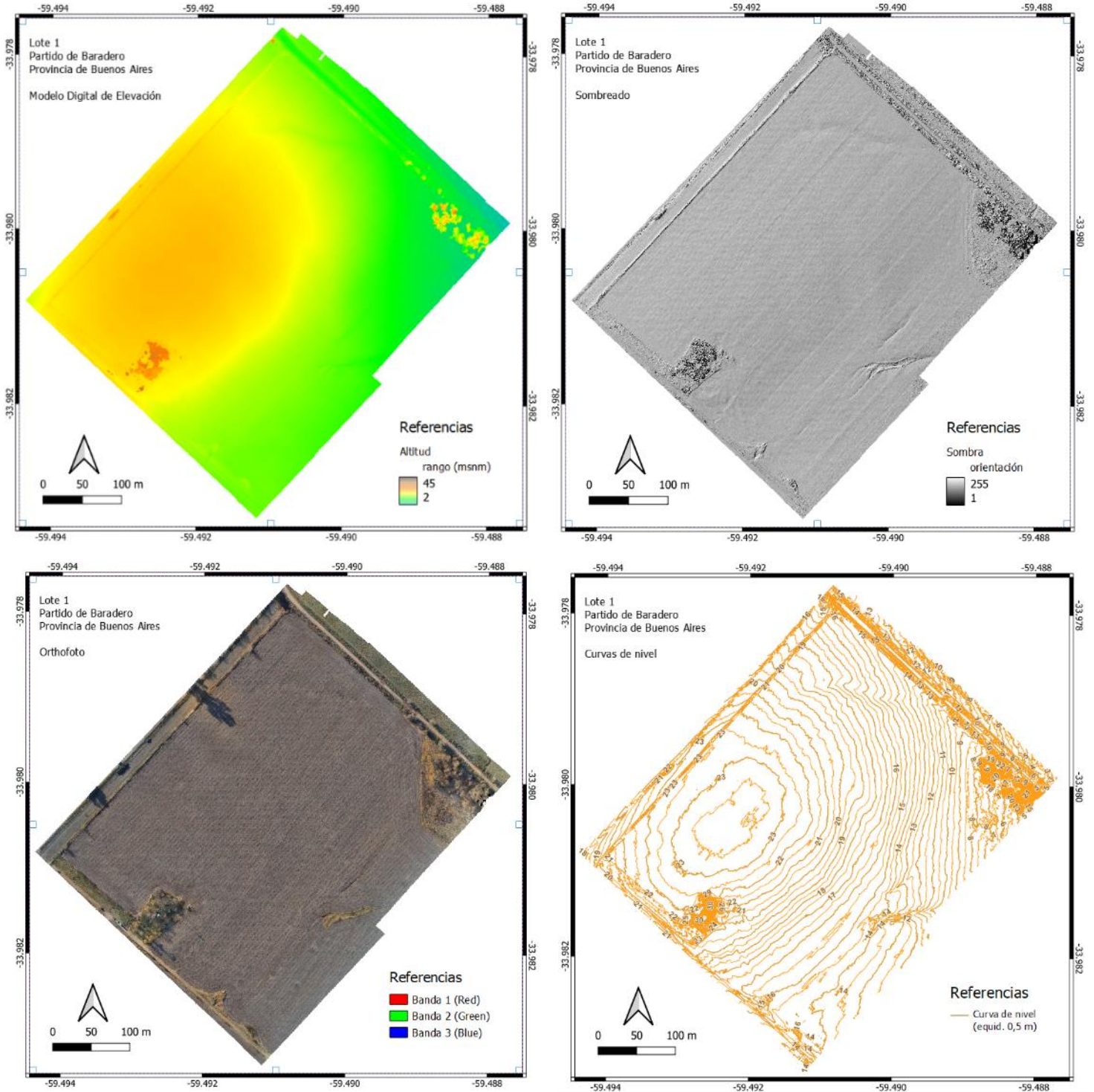
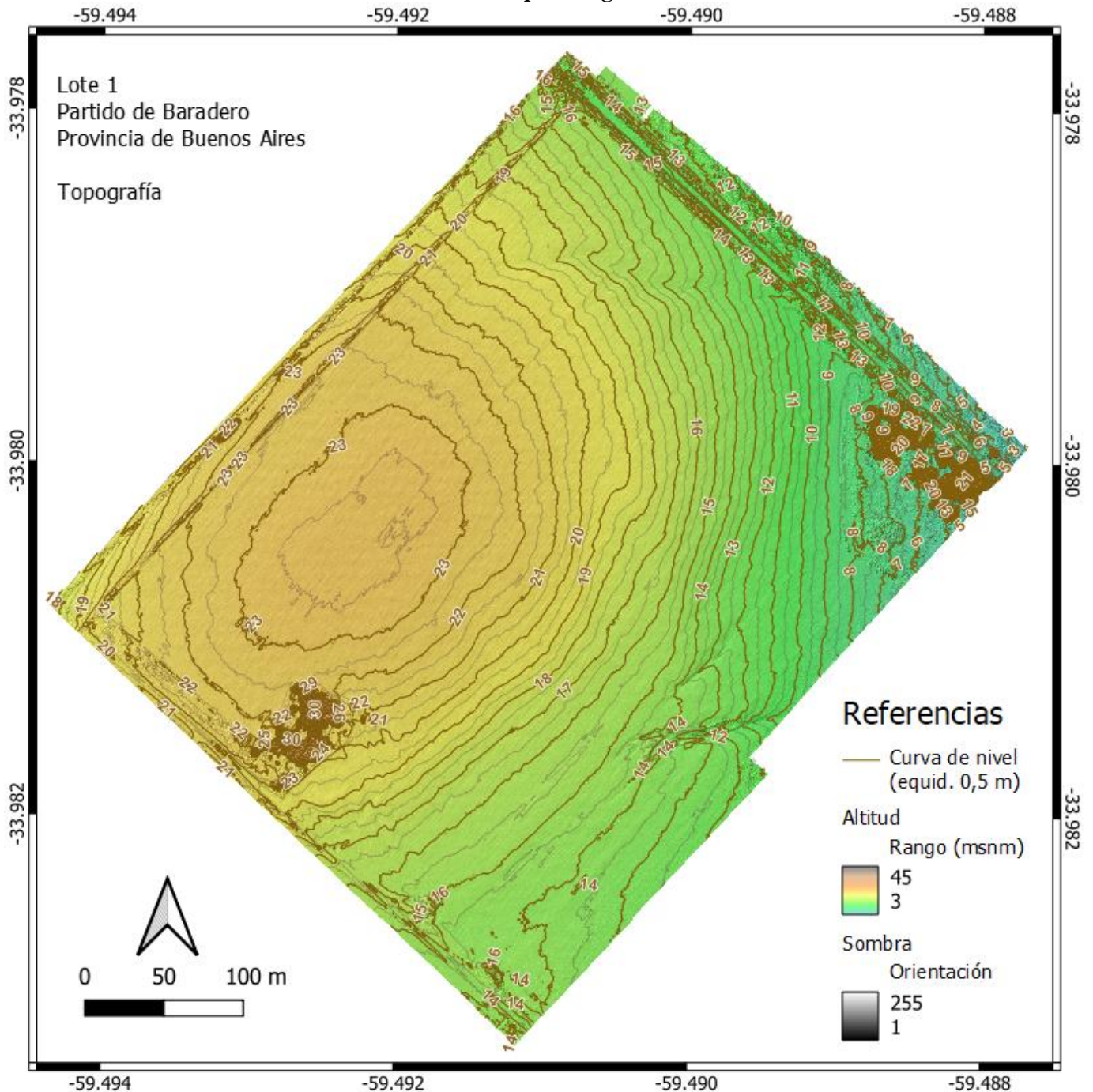


Figura 18. Cartografía topográfica del área de estudio, que integra distintas capas elaboradas por fotogrametría.



## CONCLUSIONES

La captura de información mediante VANTs permite generar mucha información topográfica en relativamente poco tiempo, lo que facilita el trabajo del relevamiento en campo. Los MDE generados en este trabajo presentan una resolución espacial de 6,82 y 6,88 cm/pix y una densidad de puntos de 215 puntos/m<sup>2</sup>, en cada modelo respectivamente, lo que representa un nivel de detalle que no es posible obtener con equipos topográficos tradicionales tales como nivel óptico, teodolito o Estación Total.

El traslape frontal y lateral de las imágenes juegan un papel importante en el producto obtenido, ya que determinan el número de imágenes en que se observa un mismo punto. Un traslape frontal y lateral promedio mínimo de 75 % garantiza una cantidad de puntos adecuada en el MDE. Además, la misión de vuelo debe programarse para una superficie mayor de la zona de interés, ya que cerca de los límites del área de vuelo en donde se traslapan pocas imágenes la precisión es menor que en las zonas centrales.

Comparando los Modelos 1 y 2, se observa que los mayores errores en altitud (eje Z) en los MDE corresponden al Modelo 1, que es aquel cuya restitución fotogramétrica se realizó tomando la georreferenciación de cada fotograma referida al navegador GPS incorporado al dron. El parámetro estadístico más confiable para determinar la precisión de los modelos es la RCME ya que es sensible a grandes errores. A su vez, el estimador EM brinda información útil, pero no es recomendable cuando se presentan errores de gran magnitud.

La utilización de PCT mejoró notablemente la precisión del MDE en el Modelo 2, pero sólo en los sectores donde fueron emplazados dichos PCT y presenta deformaciones significativas en el resto de la superficie relevada, lo que provoca la inutilidad de este producto fotogramétrico. Por lo tanto, es indispensable la colocación bien distribuida de PCT a lo largo de la zona de estudio.

Respecto al Modelo 1, es importante señalar que, si bien presenta errores derivados de la precisión del navegador GPS (que ronda de 3 a 10 m), estos se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda la superficie relevada. En cada caso, se debe analizar qué tan significativo es el error estadístico en productos cartográficos elaborados a diferentes escalas. La elección de una escala adecuada depende para los propósitos para los cuales se utilizará la cartografía.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Baltasar Toharias Góngora (2020) Comparativa entre software propietario y libre en levantamientos fotogramétricos con RPAs. Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Aeronáutica. Universidad de Sevilla.

Cabezos, P., & Cisneros, J. (2012). Fotogrametría con cámaras digitales convencionales y software libre. *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 20(1), 88-99.

Gómez-Candón, D., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, 15(1), 44-56.

Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, 1207-2014.

Hugenholtz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B., LeClair, A., Riddell, K., & Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16- 24.

Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., Flores-Velázquez, J., Marcial-Pablo, M. J., & Robles-Rubio, B. D. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85-100.



Nex, F. C., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-1-2015

Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B., & Lapointe, M. (2014). Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River Research and Applications*, 31(3), 379-391.

Uysal, M., Toprak, A., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73(1), 539-543

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

Zafra Granados, Yesid (2018) Manual para el postproceso de imágenes obtenidas a partir de una aeronave tripulada remotamente (drone) en los software Agisoft Photoscan y Pix4d. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14055/ZafraGranadosYesidRomairoAnexo-1.pdf;jsessionid=908646DEEA4BD4B80256B44BCCA6CBD3?sequence=2>

---

Recibido: 2 de mayo de 2023 / Aprobado: 26 de mayo de 2023 / Publicado: 9 de junio de 2023

© 2023 Los autores



Esta obra se encuentra bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0. Internacional. Reconocimiento - Permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas siempre y cuando reconozca y cite al autor original. No Comercial – Esta obra no puede ser utilizada con fines comerciales, a menos que se obtenga el permiso.

---