



Capítulo 9



Morfología del terreno mediante fotogrametría con drones: oportunidades y limitaciones para la detección de fosas clandestinas

Ana Josselinne Alegre Mondragón¹ y José Luis Silván Cárdenas²

Contribución arbitrada

Resumen

Uno de los obstáculos para realizar fotogrametría dirigida a la búsqueda de personas desaparecidas son los costos asociados a equipos y software para el procesamiento de los datos. En este capítulo se muestran los resultados del monitoreo para detectar los cambios en la morfología del terreno — como consecuencia de las inhumaciones en el sitio de experimentación forense Polígono 1 —, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados comerciales equipados con una cámara RGB.

Además, se presenta una metodología para realizar el procesamiento de productos fotogramétricos con software libre. Este trabajo tiene dos objetivos: exponer alternativas para replicar el uso de fotogrametría a un bajo costo y mostrar los resultados de los cambios en este sitio de experimentación. Se presentan las etapas para obtener productos fotogramétricos y se

1 Profesora Investigadora Asociada A, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Email: jalegre@centrogeo.edu.mx

2 Profesor Investigador Titular C, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Email: jsilvan@centrogeo.edu.mx

concluye que el software libre tiene un gran potencial para hacer más accesible la observación de cambios asociados a la detección de fosas clandestinas.

Palabras clave: percepción remota, fotogrametría, drones, topografía, morfología, *OpenDroneMap*.

I. Percepción remota y fotogrametría

En este capítulo se presenta el potencial del uso de fotogrametría para la detección de las fosas simuladas en el campo de experimentación forense denominado Polígono 1. Pero, antes de comenzar definiremos algunos conceptos.

De acuerdo con la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS):

la fotogrametría y la percepción remota son el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiable a partir de imágenes y otros sistemas de sensores acerca de la Tierra y su entorno, así como de otros objetos físicos y sus procesos a través del registro, la medición, el análisis y la representación (ISPRS, s.f., párr. 1).

Percepción Remota (Remote Sensing) o Teledetección puede definirse como la técnica que permite obtener información de un objeto, área o fenómeno, analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo o sensor que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Chuvienco, 2019). Mientras que, la topografía, es una ciencia que se encarga del estudio de la superficie terrestre, así como de sus accidentes geográficos y otras características implícitas. Se puede decir, de otra manera, que estudia el conjunto de procedimientos que tienen como finalidad la representación gráfica de la superficie de la Tierra y también se encarga de establecer ciertos métodos para llevar a cabo las descripciones pertinentes (Ingeoexpert, 2021).

La fotogrametría es útil en tareas como el monitoreo de cultivos, producción de cartografía, elaboración de análisis hidrológicos, medición en proyectos de construcción, clasificación de la vegetación, análisis de volúmenes, inspección de tejados, entre otras muchas tareas, siempre que se requiera la observación de objetos y del terreno.



Las ventajas del uso de la fotogrametría son la obtención de representaciones completas de objetos, registros instantáneos y la posibilidad de guardarlos para su observación posterior en forma digital: materiales relativamente económicos, que nos brindan la opción de analizar objetos en movimiento y sin perturbarlos. De acuerdo con el tipo de fotografía, las podemos clasificar en terrestres (es decir, las que tomamos desde la superficie terrestre) o aéreas (obtenidas con alguna cámara o sensor instalado en una aeronave).

En pocas palabras, la percepción remota tiene un gran potencial como herramienta para la detección de fosas clandestinas, ya que se trata de estudiarlas sin alterar el sitio y prácticamente sin tener contacto directo con este objeto de estudio. El principal objetivo de este capítulo es mostrar como el uso de drones equipados con una cámara RGB y el procesamiento de imágenes nos pueden ayudar a la identificación de cambios en el terreno para la detección de fosas clandestinas.

¿Por qué sugerimos el uso de drones comerciales equipados con una cámara RGB? Actualmente, son más accesibles en cuanto a precio y manejo (a la hora de volar): incluso han comenzado a ser instrumentos básicos en las comisiones de búsqueda y en algunos colectivos de familiares.

Más allá del uso de drones para el acompañamiento y seguridad en el trabajo de campo, resulta muy útil procesar las imágenes y videos tomados para detectar cambios más finos en el territorio y “acceder” de forma digital a sitios en que no es posible hacerlo de forma física — y planificar las búsquedas siguientes, en su caso —. Por tal motivo, en este capítulo se muestran las etapas para el levantamiento de imágenes, su procesamiento y los resultados del monitoreo en el Polígono 1, durante un año.

En el primer apartado se realiza un recuento de los estudios previos, tanto en otras partes del mundo como en México, investigaciones en las que se ha utilizado la fotogrametría en aplicaciones forenses y, especialmente, para la detección de fosas clandestinas. Después, se detalla qué drones y cómo se usaron en la zona de experimentación forense Polígono 1. Posteriormente se muestran las opciones para realizar el procesamiento con el objetivo de que este ejercicio pueda replicarse en otros sitios y, finalmente, se exponen las conclusiones y las áreas de oportunidad para posteriores estudios.



II. Fotogrametría para la detección de fosas clandestinas

Algunas de las primeras aplicaciones de las fotografías aéreas fueron militares. Tradicionalmente estas imágenes han permanecido almacenadas en archivos gubernamentales y de agencias privadas para que, posteriormente, las personas usuarias las utilicen de acuerdo con sus necesidades (Ebert, 2015). Sin embargo, con el acceso comercial más generalizado y un menor costo de vehículos aéreos no tripulados (comúnmente llamados drones), la obtención de fotografías es más sencilla y tiene múltiples aplicaciones.

En arqueología forense, se han estudiado las modificaciones en la elevación de la superficie del terreno, ocasionadas por entierros, como resultado de la desintegración de los cuerpos y la compactación de la tierra (Corcoran et al., 2018).

Sin embargo, no siempre se observan dichos cambios — debido a que la cantidad de cuerpos depositados en una fosa influye en su detección —, además, éstos suelen ocurrir lentamente y pueden ser enmascarados por otros factores, como la regeneración de la vegetación, la acumulación de hojarasca, y las perturbaciones por animales, entre otros.

Es por ello que uno de los sensores más utilizados para la detección de cambios muy suaves en el terreno es el LÍDAR: un sensor activo que trabaja con luz polarizada o láser. Es decir, que es capaz de emitir sus propias ondas electromagnéticas y grabar posteriormente el haz reflejado por el objeto bajo estudio (Chuvieco, 2019).

Por lo tanto, se cuenta con estudios que utilizan LÍDAR para el monitoreo de los cambios en fosas clandestinas (Corcoran et al., 2018; Blau et al., 2018; Watson et al., 2021). No obstante, una de las grandes desventajas es que este sensor es muy costoso, en comparación con las cámaras RGB.

Por otro lado, el empleo de la fotogrametría para monitorear la forma del terreno es un área de oportunidad que ha sido poco explorada. Los drones comerciales equipados con cámaras RGB se han utilizado en tareas de búsqueda y rescate (Pensieri y Garau, 2020) y en escenas forenses simuladas (Parrot et al., 2019; Urbanova et al., 2017; Murray et al., 2018).

En Silván-Cárdenas et al. (2021), se reportó un primer intento por detectar fosas con fotogrametría y otras técnicas de percepción remota. Sin embargo, el ejercicio no fue muy exitoso debido, principalmente, a la incapacidad de un sensor pasivo de mapear la superficie del suelo en presencia de vegetación densa. En este sentido, la pregunta que nos hicimos

durante el monitoreo del Polígono 1 es si era posible detectar cambios, como hundimientos en las fosas a través del tiempo y los diferentes tratamientos asociados a los *modus operandi* observados en fosas reales en Jalisco.

En principio, a partir del procesamiento de las nubes de puntos y los Modelos Digitales de Terreno (MDT) se podrían observar y medir las variaciones, así que utilizamos dos softwares diferentes para detectar estos cambios por medio de la observación y mediciones.

III. El uso de los drones en la zona de experimentación

Para el monitoreo de la zona de experimentación en el Polígono 1, con cámaras RGB, se realizaron cinco vuelos con dos sistemas aéreos no tripulados o drones. El primero fue con un modelo *DJI Phantom 4P MS* (Figura 1). Este dron está equipado con una cámara multispectral y RGB de 2.12 megapíxeles, además cuenta con un Multifrecuencia multisistema RTK de alta precisión GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), lo que permite obtener modelos cartográficos de alta precisión.

Lamentablemente este dron se averió después del primer levantamiento y no fue posible realizar el monitoreo subsecuente con este equipo.

Figura 1. Dron DJI Phantom 4P MS RTK (izq.) y levantamiento en el Polígono 1 con RTK en junio de 2023 (der.)



Fuente: imagen tomada de <https://www.dji.com/mx/p4-multispectral> (izq.) y fotografía tomada en el campo de experimentación Polígono 1 por los autores (der.).

Los siguientes cuatro levantamientos se realizaron con un dron modelo *DJI Phantom 4 Advanced* equipado con una cámara RGB de 20 megapíxeles. Si bien no cuenta con la misma precisión absoluta que el RTK, su cámara de alta resolución puede generar productos con alta precisión relativa, además es un equipo que permite realizar misiones, es decir, vuelos programados y levantamientos con calidad suficiente para los objetivos planteados en cuanto al monitoreo de los cambios de la morfología del terreno y obtener materiales óptimos para realizar procesos fotogramétricos (Figura 2).

Figura 2. Dron DJI Phantom 4 Advanced (izq.) y levantamiento en el campo de experimentación Polígono 1 en agosto 2023 (der.)



Fuente: imagen tomada de <https://www.dji.com/mx/p4-multispectral> (izq.) y fotografía tomada en el campo de experimentación Polígono 1 por los autores (der.).

¿Cuáles son los pasos para levantamientos fotogramétricos?

Ya que el objetivo no es solamente tomar fotografías o videos del Polígono 1, sino la obtención de productos fotogramétricos, se sugiere llevar a cabo el levantamiento en cinco etapas: planeación de vuelos, preparación y trabajo en el sitio, levantamiento de la

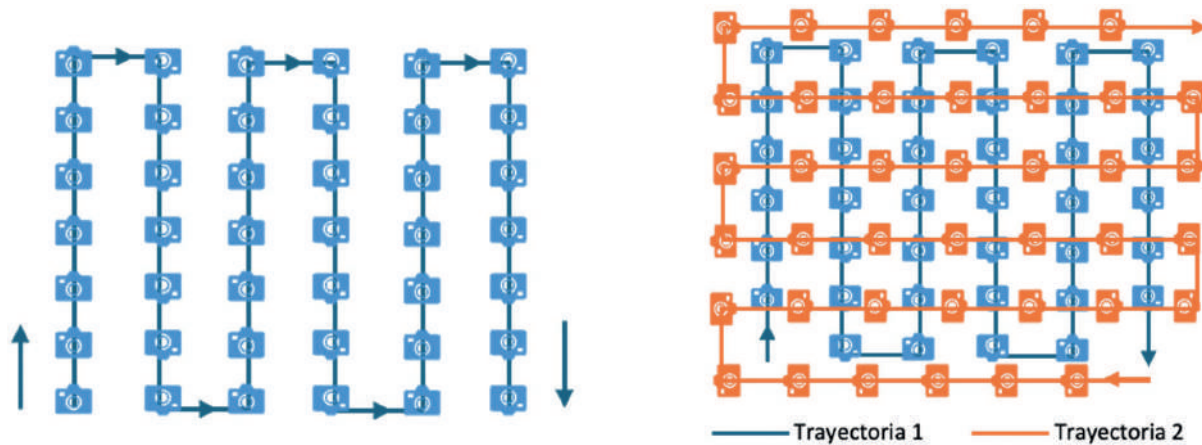
información, evaluación del levantamiento en campo y procesamiento en gabinete (Silván-Cárdenas, Alegre-Mondragón y Madrigal-Gómez, 2022).

Planeación de los vuelos

Para estudiar la morfología y los cambios del terreno en el sitio de experimentación se utilizaron dos planes de vuelo, de barrido simple y de barrido doble. En el barrido simple se realiza una trayectoria con líneas paralelas y con un traslape mínimo de 75% frontal, 60% lateral (Figura 3, izq.). Mientras que el barrido doble es ideal para reconstrucciones en 3D, en este caso es necesario completar dos barridos en direcciones ortogonales (Figura 3, der.) y utilizar un traslape frontal por lo menos de 75% y lateral de 60% (Silván-Cárdenas, Alegre-Mondragón y Madrigal-Gómez, 2022).

Se recomienda revisar previamente que se cuenta con el equipo completo antes de salir a campo, como tableta o teléfono inteligente, control remoto, memorias con espacio suficiente y todas las baterías con la carga completa.

Figura 3. Planes de vuelo: Barrido simple (izq.) Barrido doble (der.)



Fuente: elaboración propia de CentroGeo.

Preparación y trabajo en el sitio

Una vez que hemos llegado al sitio de levantamiento, se debe verificar el clima y seguridad del sitio (Silván-Cárdenas, Alegre-Mondragón y Madrigal-Gómez, 2022).

En este caso se establecieron cuatro puntos de control, se deben conocer las coordenadas geográficas y la altura de cada uno de estos puntos GPS (Sistema de Posicionamiento Global) porque servirán, posteriormente, para ajustar los modelos en el procesamiento de datos (ya que los levantamientos se realizaron en diferentes fechas e incluso con diferentes equipos). En el Polígono 1 se tomaron como puntos de control las esquinas del sitio, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Puntos de control en las esquinas del Polígono 1



Fuente: elaboración propia en *OpenDroneMap (ODM)*. CentroGeo.

Levantamiento de la información

Se realizaron cinco vuelos; el primero fue una semana después de la inhumación y, posteriormente, en agosto y noviembre de 2023, así como febrero y mayo de 2024³. Es importante señalar que en el segundo levantamiento se realizó el “Congreso: Análisis y Procesos para la Búsqueda de Personas” dirigido a personal de la COBUPEJ y colectivos de búsqueda de los estados de Jalisco y Guerrero (Figura 2 der.), por lo tanto, fue necesario ejecutar el levantamiento en dos vuelos con el objetivo de explicar todos los procesos de monitoreo —no solamente fotogramétricos —, que se llevaron a cabo ese día con las personas asistentes al evento.

Tabla 1. Registro de los vuelos realizados para el monitoreo

Vuelo	Fecha	Hora inicio	Hora final	Tiempo de vuelo	Dron-Cámara	Plan de vuelo	Fotografías	Altura
1	8-Jun-2023	08:17	09:02	45 min	DJI Phantom P4 MS RTK	Barrido simple	353	30 m
2	22-Ago-2023	09:00	11:35	2 horas 35 min	DJI Phantom 4 Advance	Barrido simple	199	30 m
3	21-Nov-2023	14:24	14:59	35 min	DJI Phantom 4 Advanced	Doble barrido	243	30 m
4	23-Feb-2024	10:32	10:48	16 min	DJI Phantom 4 Advanced	Doble barrido	242	30 m
5	23-May-2024	11:58	12:11	13 min	DJI Phantom 4 Advanced	Doble barrido	240	30 m

Nota. Elaboración propia. CentroGeo.

Evaluación del levantamiento en campo

Una de las ventajas al estudiar un campo de experimentación forense, en comparación con sitios de búsqueda reales, es que sabemos exactamente en dónde está y podemos planificar los vuelos con anticipación. Además, en este caso, el Polígono 1 se encuentra en

3 En la Tabla 1 se presentan las características de cada uno de los levantamientos.

una zona urbana y con cobertura de comunicaciones y electricidad. Por lo tanto, siempre se verificó en campo que las fotografías se hubieran descargado efectivamente en un equipo de cómputo. Este paso parece trivial, pero se sugiere revisar, porque en caso de no contar con las fotografías por algún error, se pueden repetir las misiones.

Procesamiento en gabinete

¿Por qué se deben procesar las fotografías tomadas por los sensores o cámaras en los drones? Esto se debe a que son muchas fotografías y cada una de ellas solo muestra un pedacito del sitio con perspectivas distintas. Entonces, los datos se deben consolidar para elaborar los productos finales con proyección ortográfica, que nos permitan medir la forma conjunta del terreno en el Polígono 1. En el caso de las fotografías tomadas con cámara RGB, este procedimiento involucra la alineación de imágenes, creación de la nube de puntos y la generación de ortomosaicos, modelos digitales de elevación en formato RASTER⁴, en los cuales se asocia información de la elevación del terreno a cada punto de una retícula (Arriola Valverde et al., 2018).

El procesamiento de las imágenes se puede realizar con software libre o comercial. Aquí empleamos el software libre *OpenDroneMap* (OpenDroneMap, s.f.) (aún se encuentra en desarrollo, por lo que sus resultados pueden no ser tan precisos).

También empleamos el software comercial Pix4D (Pix4D, s.f.), que, si bien no es económico, proporciona un alto grado de automatización y produce resultados más precisos. En este capítulo decidimos mostrar el proceso con el software libre, así las personas usuarias podrán replicar el ejercicio en otros sitios. Además, presentamos los resultados con el software comercial, de esta forma se podrá elegir qué software utilizar de acuerdo con las necesidades y casos de estudio. Con ambas opciones se pueden obtener una serie de productos que serán descritos a continuación, así como su utilidad.

Productos fotogramétricos

Los productos que se obtuvieron a partir de los levantamientos con cámara RGB nos permiten observar los detalles del Polígono 1 en forma digital y medir los cambios a través

4 Los rásteres están formados por una matriz de píxeles (también llamados celdas), cada uno de los cuales contiene un valor que representa las condiciones para el área cubierta por esa celda.

del tiempo. En este caso se generaron nubes de puntos, ortomosaicos, modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT) y perfiles de terreno:

- **Nubes de puntos 3D.** Es el primer producto resultante del escaneo láser o la fotogrametría digital. Se compone por millones de puntos posicionados tridimensionalmente en el espacio, formando una entidad física y representando su superficie externa (IDEA, 2019).
- **Ortomosaicos.** Es una composición de imágenes con corrección geométrica para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular. También conocida como ortoimagen, ortofoto u ortofotografía, es una imagen aérea de alta resolución generada a partir de las fotos tomadas por un dron. Las fotos se unen con un software especializado mediante un proceso llamado ortorectificación. La ortorectificación elimina la perspectiva de cada imagen individual para crear consistencia en todo el mapa, manteniendo el mismo nivel de detalle de la imagen original (DJI ARS Madrid, s.f.).
- **Modelo Digital de Superficie.** Contiene toda la información geométrica de la zona de estudio, así como de sus texturas y acabados. Sirve como base para obtener mediciones, pero debemos contemplar que en este modelo se incluyen todos los elementos que hay en la superficie, como la vegetación, vehículos y construcciones, infraestructura y el terreno, ya que se generan tomando los valores máximos de elevación en una nube de puntos.
- **Modelo Digitales de Terreno.** Se generan clasificando la nube de puntos. Para esto existen distintos métodos dependiendo del software que se utilice; el objetivo es descartar los elementos que están en la superficie como vegetación, vehículos, construcciones e infraestructura y obtener un modelo morfológico de la superficie del terreno, por decirlo de alguna forma “limpio”, lo que nos permite identificar cambios propios de la superficie, como los hundimientos.
- **Perfil de terreno o perfil topográfico.** Un perfil topográfico o corte topográfico es una representación del relieve del terreno que se obtiene cortando transversalmente las líneas de un mapa de curvas de nivel, o mapa topográfico (Cartografía Digital, 2017). Permite visualizar y analizar las características del terreno a lo largo de una

línea específica, lo que resulta útil en diversas aplicaciones, como la planificación de rutas, estudios geológicos o diseño de carreteras, entre otros. Un perfil topográfico es una herramienta fundamental para comprender la topografía de un área y obtener información detallada sobre las elevaciones del terreno (Morales, s.f.).

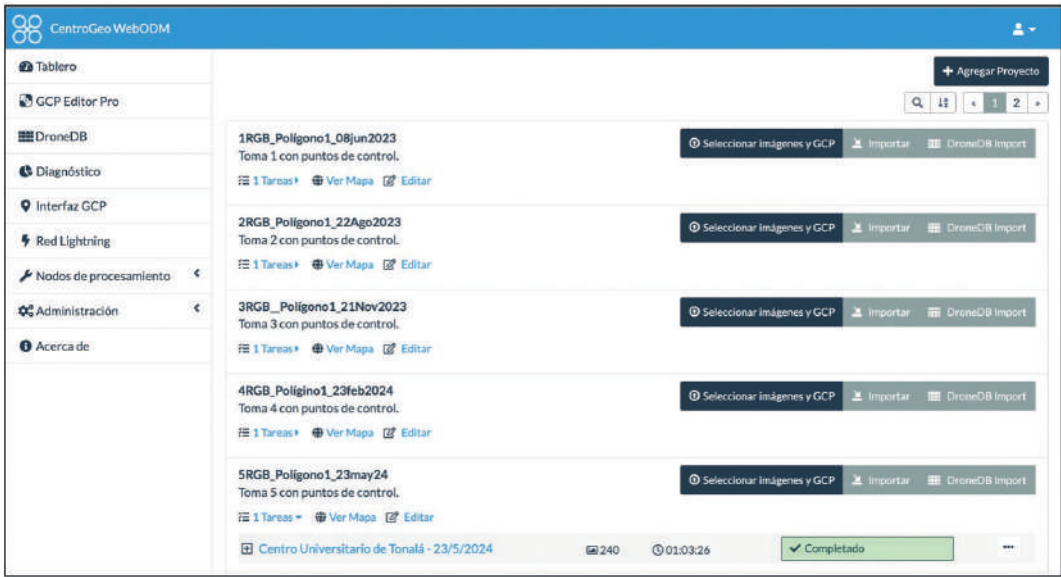
Procesamiento de imágenes con *OpenDroneMap* (ODM)

Una vez realizados los vuelos y tomadas las fotografías, el procesamiento para la obtención de productos se realizó con el software libre *OpenDroneMap* (Toffanin, 2023). En este software se puede agregar un nuevo proyecto y seleccionar las imágenes y los puntos de control.

Las imágenes deben estar en una misma carpeta, igual que el archivo de los puntos de control. Este archivo se elabora en la interfaz GCP en formato TXT, seleccionando en la barra izquierda del tablero (Figura 5): el resultado es un archivo que relaciona los puntos de control —con coordenadas— con las fotografías en donde estos puntos son visibles (Toffanin, 2023). Finalmente se puede agregar la altura y corregir, en su caso, las coordenadas exactas. En la Tabla 2 se muestra el ejemplo del archivo de puntos de control para el primer levantamiento. En el encabezado se debe definir el Sistema de Referencia de Coordenadas, en este caso “EPSG:32613”⁵. En las columnas se muestran las coordenadas de los puntos de control, la altura y el punto correspondiente con la imagen, la imagen a la que corresponde identificada con el nombre del archivo y, por último, el punto de control al que se refiere. Cada esquina tiene un identificador, que va del 00 al 03.

5 El código EPSG corresponde a las siglas, en inglés, de European Petroleum Survey Group, organización científica relacionada a la industria petrolera. Dicha organización elaboró un repositorio de parámetros geodésicos EPSG, que es la base de datos que contiene información a nivel mundial sobre los sistemas de referencia de coordenadas (nombre, tipo, código), proyecciones cartográficas, entre otros (Mastergis, 2022). En la siguiente página se pueden consultar los códigos <https://epsg.io/>. El código EPSG:32613 es el que le corresponde al estado de Jalisco, Sistema de Coordenadas Proyectadas entre 108°O y 102°O, Hemisferio Norte entre el Ecuador y 84°N, en tierra y mar adentro.

Figura 5. Tablero del software OpenDroneMap (ODM)



Fuente: elaboración propia en OpenDroneMap (ODM). CentroGeo.

Tabla 2. Ejemplo del archivo .TXT de los puntos de control generado a partir del primer levantamiento

EPSG:32613						
684405.134	2275407.281	1541.628	838.8154739461772	629.1870992380457	DJI_0310.JPG	gcp00
684405.134	2275407.281	1541.628	841.3071065989848	507.61421319796955	DJI_0300.JPG	gcp00
684390.588	2275409.725	1541.719	753.9974619289341	690.3553299492386	DJI_1080.JPG	gcp01
684390.588	2275409.725	1541.719	745.6581160096933	551.9539510832133	DJI_1070.JPG	gcp01
684399.587	2275368.792	1542.676	553.6504615588808	656.3401748524426	DJI_0170.JPG	gcp02
684399.587	2275368.792	1542.676	549.8595171407347	524.4165760480815	DJI_0160.JPG	gcp02
684384.487	2275370.955	1542.761	808.9248213627551	746.3705595240033	DJI_1370.JPG	gcp03
684384.487	2275370.955	1542.761	792.1378217280725	616.0085118011589	DJI_1360.JPG	gcp03

Fuente: elaboración propia en OpenDroneMap (ODM). CentroGeo.

Una vez cargadas las imágenes y los puntos de control, el software comienza a procesar los productos que hayamos seleccionado, en este caso la nube de puntos y los modelos digitales de superficie y de terreno, para este último se realiza un filtrado y se eliminan los elementos que no están en el suelo (Toffanin, 2023). En la Figura 6 se muestran los cuatro vuelos, sus trayectorias y las fotografías capturadas.

Figura 6. Vuelos y fotografías tomadas en el Polígono 1





Fuente: elaboración propia en OpenDroneMap (ODM). CentroGeo.

Este software tiene la posibilidad de descargar todos los productos generados y visualizarlos. Las nubes de puntos se descargan en archivos con distintas extensiones y se pueden exportar a otros softwares como QGIS. Pero, si se desea una vista rápida, esto se puede hacer sin salir de ODM, ya que tiene una interfaz para visualizar e incluso filtrar en Potree. En la Figura 7 se pueden observar los cambios en el filtrado de la nube de puntos: en la imagen de la derecha hay automóviles y, en la imagen de la izquierda, ya se han removido.

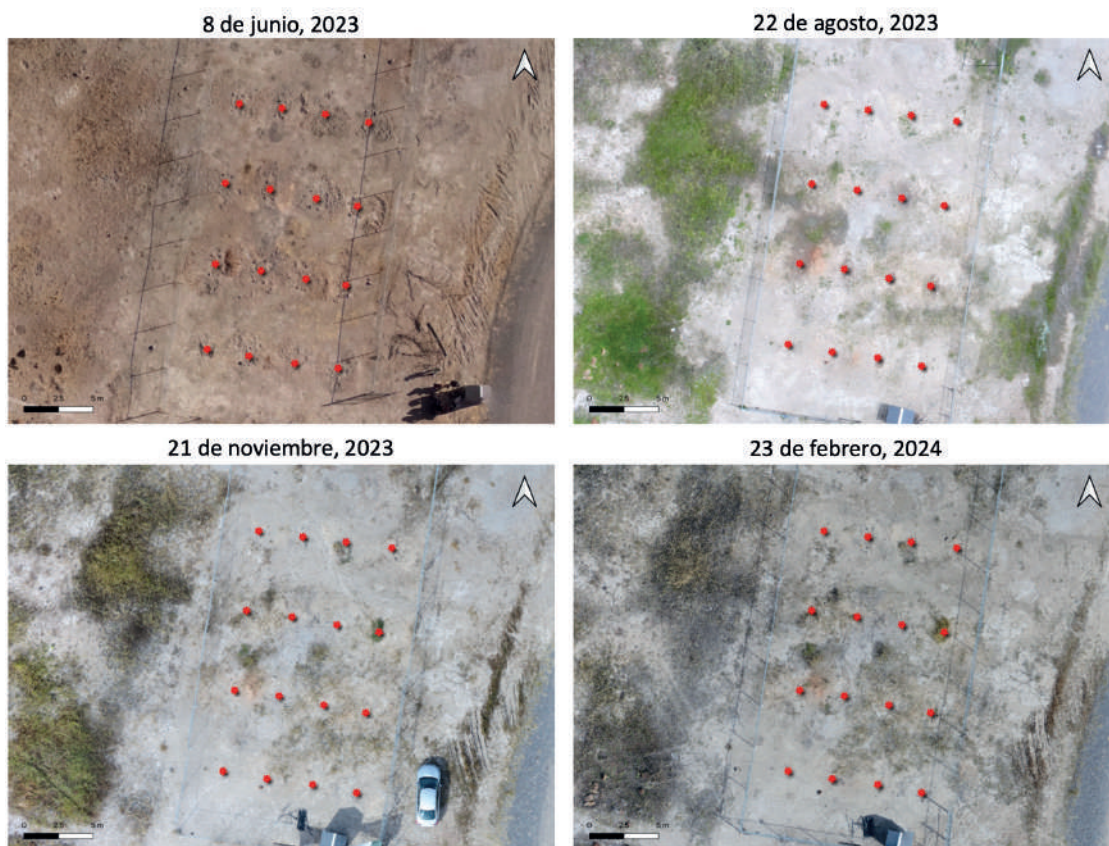
Figura 7. Visualización de la nube de puntos, tercer levantamiento sin filtro (izq.)



Fuente: elaboración propia con ODM. CentroGeo.

Como previamente se estableció, la nube de puntos es el insumo para los demás productos, ortomosaicos, MDS y MDT. Este último es muy relevante para este proyecto, ya que el objetivo es la detección de los cambios, especialmente observar si hubo hundimientos o compactación del terreno en las fosas. En la Figura 8 se pueden observar los ortomosaicos generados con cada uno de los levantamientos. A lo largo del monitoreo resalta el crecimiento de vegetación en las Fosas 5 (cuerpo seccionado a 75 cm de profundidad) y 11 (cuerpo con cobija a 75 cm de profundidad).

Figura 8. Ortomosaicos generados en cada uno de los levantamientos y centroides de cada fosa



23 de mayo, 2024

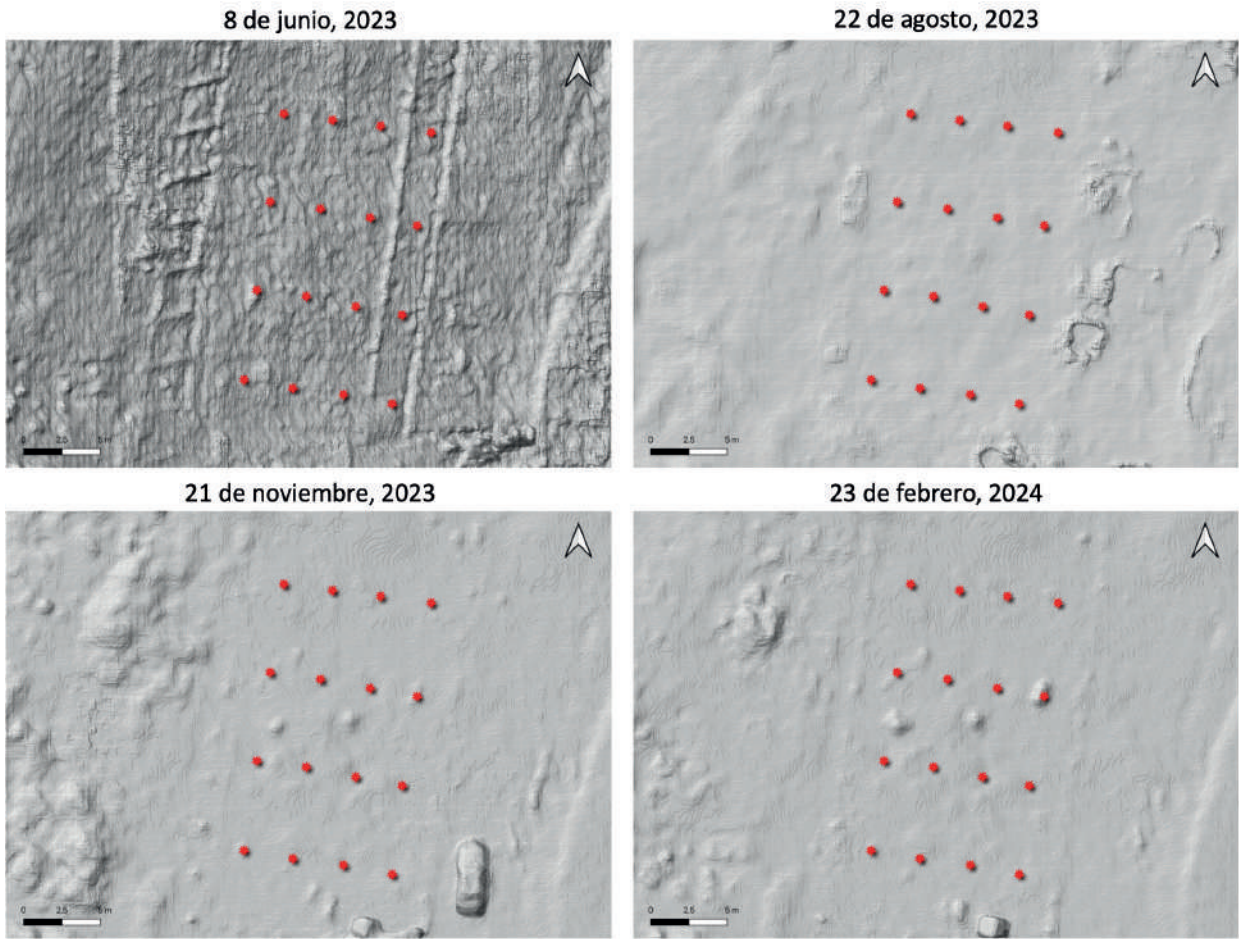


Fuente: elaboración propia con información generada en ODM y visualización en QGis.

En una visualización de los MDS, como mapa de relieve sombreado en QGis, se observan los elementos que están sobre la superficie del terreno, como la malla que rodea el sitio, automóviles y el crecimiento en la vegetación. Resalta el contraste entre el primer levantamiento y los tres posteriores, debido a la diferencia en las resoluciones de los sensores empleados (Figura 9).

A continuación, se obtuvieron los MDT, y se puede observar que algunos elementos de la superficie fueron removidos con la clasificación automatizada en ODM. Sin embargo, otros aún siguen presentes después del proceso, como las mallas en el primer levantamiento y la vegetación que fue creciendo a lo largo de un año (Figura 10).

Figura 9. Modelo digital de superficie de los levantamientos

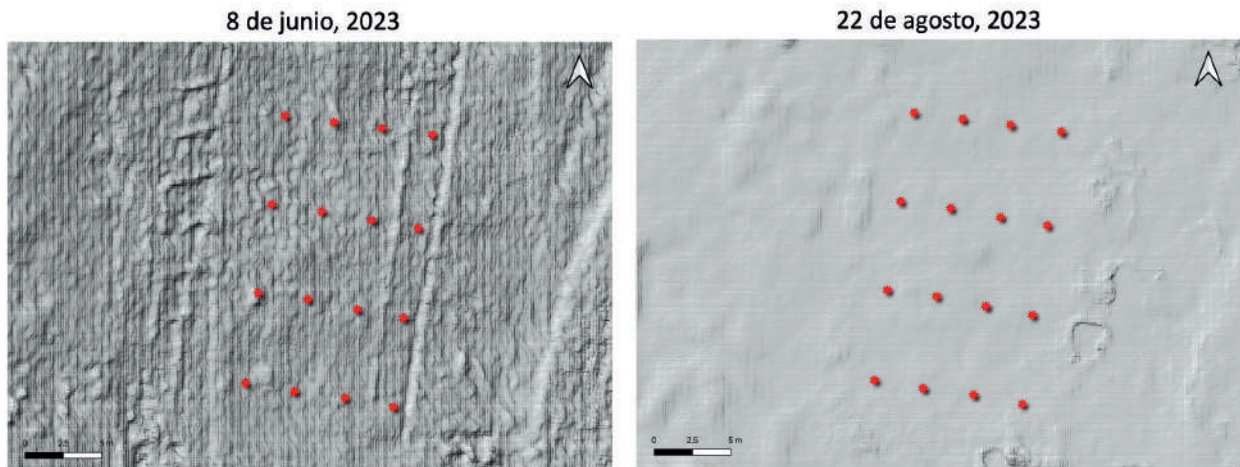




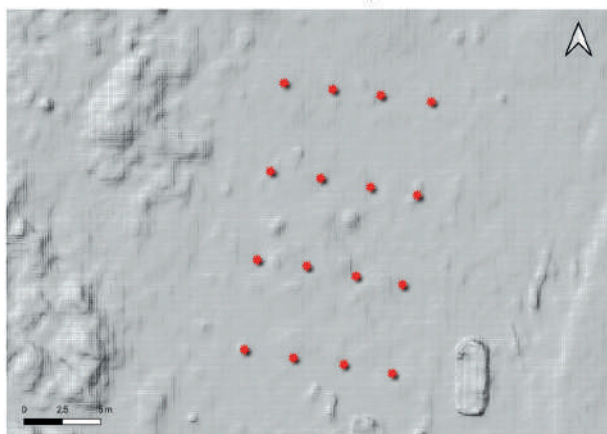
Fuente: elaboración propia con información generada en ODM y visualización en QGis.

En conclusión, ODM es un software libre y de muy fácil manejo, los algoritmos que clasifican las nubes de puntos aún necesitan mejorar. Para realizar un proceso con rapidez y para una visualización rápida es muy recomendable, habrá que esperar para un avance en los algoritmos de clasificación. En caso de requerir mayor precisión se recomienda utilizar otro tipo de softwares, con el inconveniente de que son comerciales y tienen costos, en algunas ocasiones muy altos.

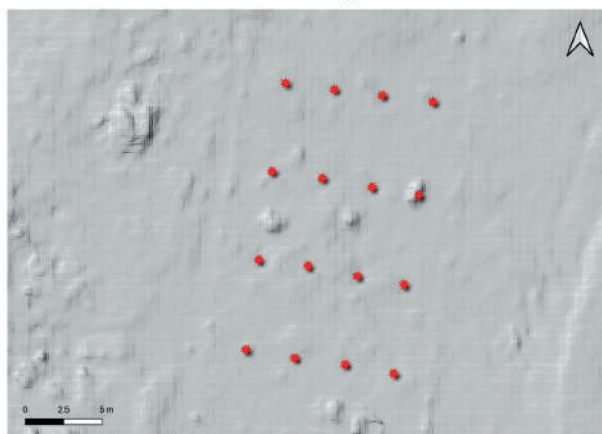
Figura 10. Modelo Digital de Terreno de los levantamientos



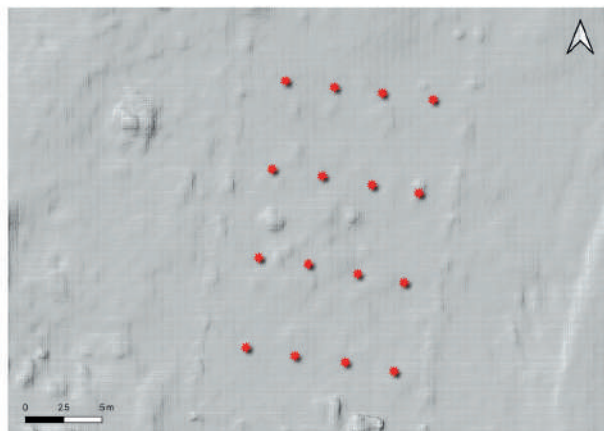
21 de noviembre, 2023



23 de febrero, 2024



23 de mayo, 2024



Fuente: elaboración propia con información generada en ODM y visualización en QGis.

Medición de los perfiles de terreno con Pix4D

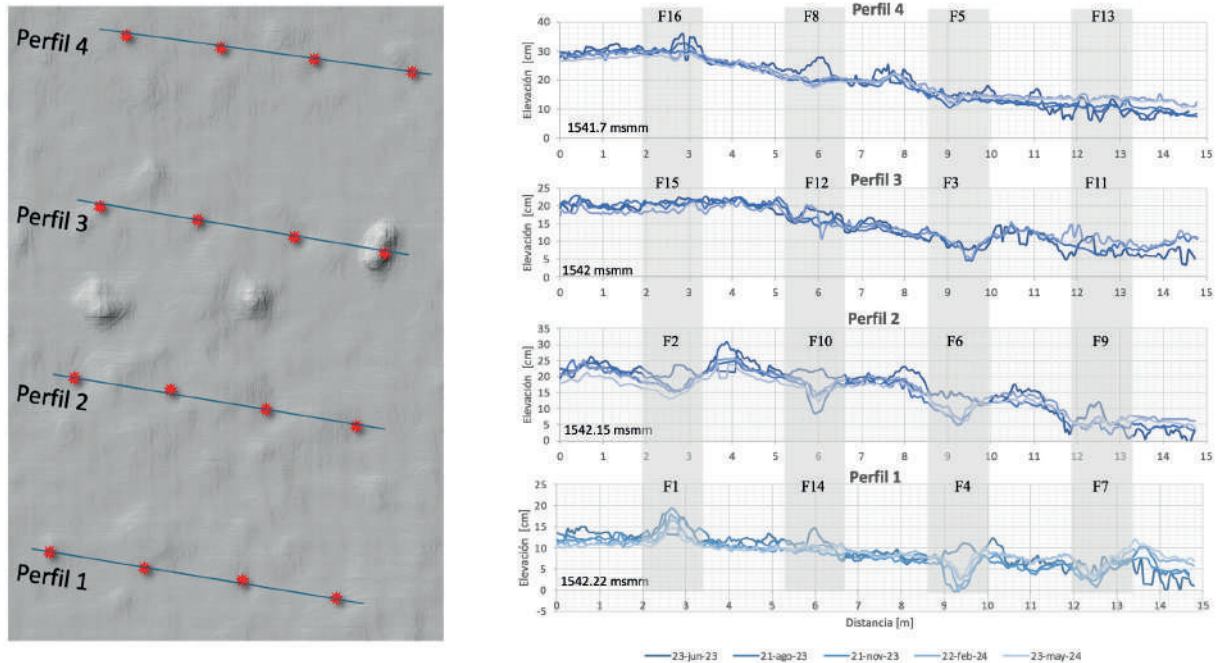
Con el fin de identificar los cambios y la existencia de posibles hundimientos o compactación del terreno en donde se realizaron las fosas, en este último ejercicio se utilizó el software Pix4D, para generar los MDT de cada fecha y así obtener valores de elevación del terreno

más precisos. A partir de los MDTs se extrajeron perfiles de elevación, que atravesaban las líneas de fosas de oeste a este, y se graficaron como se muestra en la Figura 11.

A un año de las inhumaciones se pueden observar hundimientos en las fosas 4 (cuerpo completo a 125 cm.), 7 (cuerpo con cal a 75 cm.), 6 (cuerpo seccionado a 125 cm.), 10 (cuerpo dentro de bolsa a 125 cm.), 3 (cuerpo completo a 75 cm.) y 5 (cuerpo seccionado a 75 cm.). Sin embargo, los más pronunciados se registraron en las fosas 4, 6 y 10. En Fosa 2 (sin cuerpo, de control) se observa una erosión del terreno.

Por otro lado, lo que aparenta ser un incremento en el nivel de terreno, en las fosas 12 y 11, se debe al crecimiento de la vegetación, que se observa a partir del segundo levantamiento, en agosto de 2023. En Fosa 11 ya es muy densa en noviembre del mismo año.

Figura 11. Perfiles del terreno



Fuente: elaboración propia con Pix4D. CentroGeo.

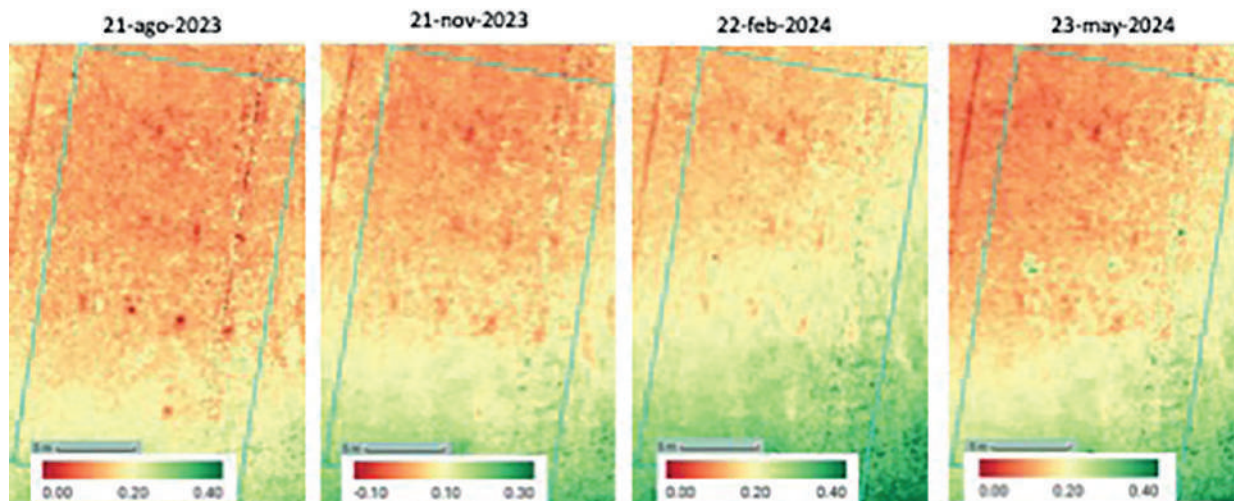
Visualizaciones alternativas para identificar cambios en el terreno

Debido a que las visualizaciones del MDT no son suficientes a simple vista para la detección de las fosas, se realizaron otros ejercicios con el objetivo de detectar de una mejor forma los cambios.

En este sentido, se calcularon las diferencias de cada una de las tomas, restando la primera de referencia. En la Figura 12 se pueden apreciar, en una forma más clara, el lugar en que se encuentran las fosas y las diferencias del nivel de terreno con respecto al primer levantamiento.

Estas imágenes son mucho más definidas que las anteriores, pudiéndose observar con claridad las fosas 4, 2, 10, 6, 9, 12, 3, 11 y 8, en agosto de 2023, posteriormente se hacen menos perceptibles.

Figura 12. Hundimientos por Sustracción de MDT de referencia (23 de junio de 2023)



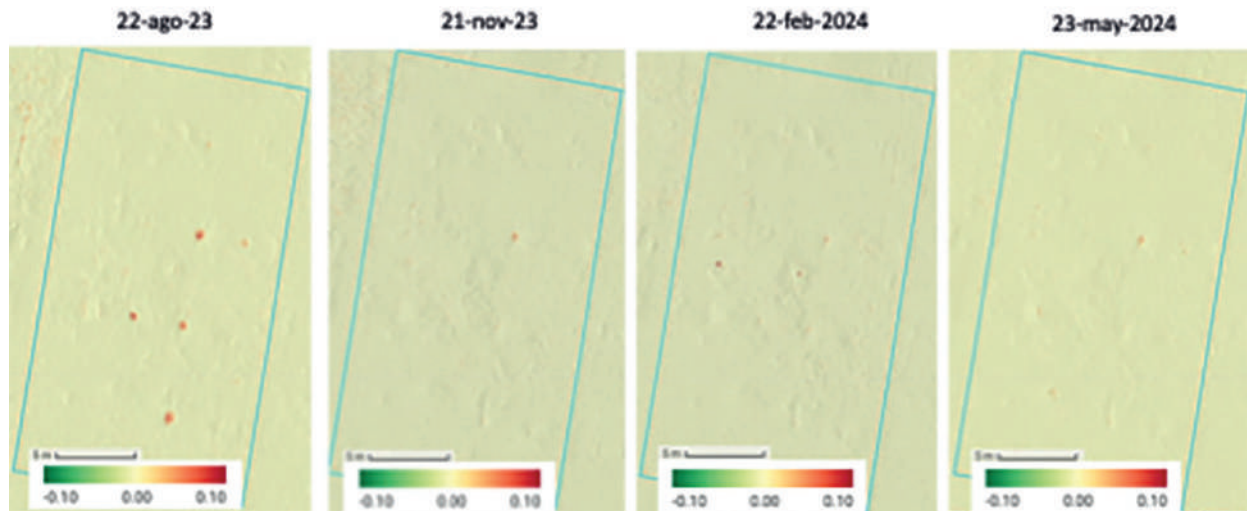
Fuente: elaboración propia en Pix4D y visualización en Google Earth Engine (Silván-Cárdenas J. L., Global Spectral. Index Mapper, 2024).

Aunque muy efectivo, este método tiene la desventaja de requerir una toma previa a las inhumaciones, lo que es casi imposible en situaciones reales. En esos casos es necesario

implementar un método que emplee un sólo levantamiento post inhumación. La alternativa es sustituir el modelo de terreno previo a la inhumación por el modelo de terreno actual con huecos rellenados mediante operaciones digitales, para lo cual existen varias alternativas en la literatura (Wang, Qin y Zhu, 2019).

La operación consiste en rellenar las depresiones pequeñas del modelo de terreno y sustraer del modelo original, generando así un mapa de depresiones. Al aplicar este método se observaron con claridad las fosas 4, 6, 10, 3 y 11, las cuales se hacen menos perceptibles conforme transcurrió el tiempo. Es decir, este método mostró ser menos efectivo que el anterior, pero, sin duda es más práctico.

Figura 13. Hundimientos por Sustracción de MDT con Huecos Rellenados



Fuente: elaboración propia en Pix4D y visualización en *Google Earth Engine* (Silván-Cárdenas J. L., Global Spectral. Index Mapper, 2024).

IV. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se utiliza la fotogrametría como un instrumento para realizar mediciones topográficas y detectar los posibles cambios a través del tiempo, especialmente los hundimientos o compactaciones del terreno con fosas.

Las inhumaciones que presentaron los mayores cambios de hundimiento fueron las fosas con cuerpos completos o con cuerpos seccionados sin importar la profundidad, o con algún tratamiento siempre a una profundidad menor. Es importante resaltar que tratamientos con cal y cuerpos en bolsa retardan la detección en el tiempo, por lo que requirieron de mayor temporalidad para ser detectadas.

De acuerdo con otros trabajos experimentales realizados para detectar fosas clandestinas, sabemos que su detección depende de las condiciones climáticas y el tamaño de las fosas (LeBlanc et al., 2014; Blau et al., 2018). Las fosas individuales son más difíciles de detectar, como es el caso del Polígono 1.

En este sentido, los cuerpos que han sido encobijados o enterrados en profundidades menores a un metro pueden ser detectables luego de tres meses de inhumación (y hasta nueve meses después de ser depositados), de acuerdo con el monitoreo, pero se debe al crecimiento de la vegetación en estos sitios y no a la medición de hundimientos.

Incluso si se aprecian los perfiles, en las fosas 11 y 12 se observa un crecimiento en el nivel de elevación, debido a las plantas. Esto coincide con el estudio reportado en Silván-Cárdenas et al. (2021), donde la vegetación tampoco permitió detectar los hundimientos causados por la descomposición de los cuerpos.

Sin duda, la presencia de plantas influye, pero también hay que tomar en cuenta que la compactación del suelo pudo haberse exacerbado por el tránsito frecuente de los grupos que trabajaron la zona durante el año de monitoreo, por lo que es seguro suponer que su detección será más difícil en casos con menor perturbación. Uno de los métodos para detectar fosas clandestinas, de acuerdo con el crecimiento en la vegetación, es la medición de la concentración de nitrógeno (Silván-Cárdenas et al., 2021). Sin embargo, ese tema se aborda en otro capítulo de la obra.

Los productos generados a partir de procesamientos fotogramétricos pueden ser útiles, siempre y cuando se complementen con algunas otras técnicas. Así, la visualización

del MDT se genera de forma rápida en ODM, pero puede ser difícil de interpretar, debido al desarrollo de los algoritmos para la clasificación de las nubes de puntos.

El método de perfiles de terreno es efectivo, pero también requiere un modelo de suavizado y clasificación eficiente, además de acotar la ubicación de los sitios de interés en un trayecto lineal.

El método de diferencia de dos MDT es muy efectivo, ya que se detectan mejor las fosas, pero resulta poco práctico en casos reales ya que generalmente no se cuenta con un MDT antes de la inhumación.

En lo que respecta al método de diferencia de MDT con huecos, puede ser práctico en casos reales, pero solo detecta hundimientos pronunciados y es sensible a errores en el MDT.

En cuanto al equipo utilizado, los drones comerciales, equipados con cámara RGB, son útiles para el monitoreo de los cambios de la morfología del terreno y el uso de software libre para el procesamiento de productos fotogramétricos puede resultar muy útil en las tareas de búsqueda en casos reales (y a muy bajo costo, en comparación con otros sensores como LiDAR). Si se compara el filtrado para la clasificación de la nube de puntos, y finalmente obtener el MDT, realizado con ODM y Pix4D, se observa que el crecimiento de la vegetación continúa apareciendo en ambos casos.

Uno de los inconvenientes de este estudio fue perder la oportunidad de continuar el monitoreo con un mismo sensor, ya que el primer levantamiento se hizo con un modelo de dron que se averió. En este sentido, se recomienda en estudios futuros, en medida de lo posible, asegurar la posibilidad de realizar todo el monitoreo con un mismo equipo. Adicionalmente, preparar un plan de vuelo de doble barrido y mantener el mismo plan en cada uno de los levantamientos subsecuentes.

Esperamos que este capítulo sirva de guía práctica para aplicar la fotogrametría y el análisis topográfico en la búsqueda forense, al tiempo que proporcione —a las personas y familiares dedicados a la búsqueda de personas desaparecidas desde las comisiones de búsqueda, colectivos, fiscalías y organizaciones de derechos humanos— los fundamentos y limitaciones para el uso de estas herramientas.



Referencias

- ARRIOLA VALVERDE, S., FERENCZ APPEL, A. & RIMOLO-DONADIO, R. (2018). *Fotogrametría terrestre con sistemas aéreos autónomos no tripulados*. Investiga TEC, 9-12.
- BLAU, S., STERENBERG, J., WEEDEN, P., URZEDO, F., WRIGHT, R. & WATSON, C. (2018). *Exploring Non-Invasive Approaches to Assist in the Detection of Clandestine Human Burials: Developing a Way Forward*. Forensic Sciences Research, 320-342.
- Cartografía Digital. (2017, 30 de marzo). *Cartografía Digital*. Obtenido de Perfil topográfico en QGIS: <https://www.cartografiadigital.es/2017/03/perfil-topografico-en-qgis.html>
- CHUVIECO SALINERO, E. (2019). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Digital Reasons.
- CORCORAN, K. A., MUNDORFF, A. Z., WHITE, D. A. & EMCH, W. L. (2018). *A novel application of terrestrial lidar to characterize elevation change at human grave surfaces in support of narrowing down possible unmarked grave locations*. Forensic science international(289), 320-
- DJI ARS MADRID (s.f.). *Realización de ortomosaicos con drones: Todo lo que necesita saber*. Obtenido de DJI News: <https://djiarsmadrid.com/es/blog/dji-news/realizacion-de-ortomosaicos-con-drones-todo-lo-que-necesita-saber>
- EBERT, J. I. (2015). *Photogrammetry, photointerpretation, and digital imaging and mapping in environmental forensics*. En B. L. Murphy, & R. D. Morrison, *Introduction to environmental forensics* (págs. 39-64). Academic Press.
- EVERS, R. & MASTERS, P. (2018). *The application of low-altitude near-infrared aerial photography for detecting clandestine burials using UAV and low-cost unmodified digital camera*. Forensic Science International, 289(<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.06.020>), 408-418.
- IDEA. (2019). *¿Qué es una nube de puntos?* Obtenido de IDEA: <https://ideaingenieria.es/nube-de-puntos/que-es-nube-de-puntos/>
- Ingeoexpert. (2021, 24 de noviembre). *¿Qué es la topografía y cuáles son sus objetivos?* Obtenido de Ingeoexpert: <https://ingeoexpert.com/2021/11/24/que-es-la-topografia-y-cuales-son-sus-objetivos/>



- ISPRS (s.f.). *Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota*. Recuperado de International Science Council : [https:// council.science/es/member/isprs-international-society-for-photogrammetry- and-remote-sensing/#:~:text=La%20fotogrametr%C3%ADa%20y%20la%20teledetecci%C3%B3n,el%20an%C3%A1lisis%20y%20la%20representaci%C3%B3n](https://council.science/es/member/isprs-international-society-for-photogrammetry-and-remote-sensing/#:~:text=La%20fotogrametr%C3%ADa%20y%20la%20teledetecci%C3%B3n,el%20an%C3%A1lisis%20y%20la%20representaci%C3%B3n)
- LEBLANC, G., KALACSKA, M. & SOFFER, R. (2014). *Detection of single graves by airborne hyperspectral imaging*. Forensic Sciences International, 17-23.
- Mastergis. (2022, 22 de junio). *Código EPSG ¿Qué es y cómo obtenerlo?* Obtenido de Mastergis: <https://mastergis.com/blog/codigo-epsg-que-es-y-como-obtenerlo/#:~:text=El%20c%C3%B3digo%20EPSG%20corresponde%20a,relacionada%20a%20la%20industria%20petrolera>
- MORALES, A. (s.f.). *Cómo crear perfiles topográficos con QGIS*. Obtenido de MappingGIS: [https:// mappinggis.com/2023/07/como-crear-perfiles-topograficos- con-qgis/](https://mappinggis.com/2023/07/como-crear-perfiles-topograficos- con-qgis/)
- MURRAY, B., ANDERSON, D. T., WESCOTT, D. J., MOORHEAD, R. & ANDERSON, M. F. (2018). *Survey and insights into unmanned aerial-vehicle-based detection and documentation of clandestine graves and human remains*. Human Biology, 90, 45–61.
- OpenDroneMap (s.f.). Obtenido de Awesome. Drone. Software.: <https://www. opendronemap.org/>
- PARROT, E., PANTER, H., MORRISSEY, J. & BEZOMBES, F. (2019). *A Low Cost Approach to Disturbed Soil Detection Using Low Altitude Digital Imagery from an Unmanned Aerial Vehicle*. Drones, 1-12.
- PENSIERI, M. G. & GARAU, M. (2020). *Drones as an Integral Part of Remote Sensing Technologies to Help Missing People*. Drones, 1-10.
- Pix4D (s.f.). Pix4D. Obtenido de <https://www.pix4d.com/es/>
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L. (2024, 31 de mayo). *Global Spectral Index Mapper*. Obtenido de Global Spectral Index Mapper: <https://jsilvan.users.earthengine.app/view/indices-espectrales-globales>
- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., ALEGRE-MONDRAGÓN, A. J. & MADRIGAL-GÓMEZ, J. M. (2022). *Detección y prospección por medio de vehículos aéreos no tripulados y tecnologías geoespaciales*. En M. QUINTO-SÁNCHEZ, *Protocolos basados en evidencia para la búsqueda de personas desaparecidas* (págs. 154-180). Universidad Nacional Autónoma de México.

- SILVÁN-CÁRDENAS, J. L., CACCAVARI-GARZA, A., QUINTO-SÁNCHEZ, M. E., MADRIGAL-GÓMEZ, J. M., CORONADO-JUÁREZ, E. & QUIROZ-SUAREZ, D. (2021). *Assessing optical remote sensing for grave detection*. Forensic Science International, 329, 111064.
- TOFFANIN, P. (2023). *OpenDroneMap: The Missing Guide. Second Edition. A practical Guide to Drone Mapping Using Free and Open Source Software*. UAV4GEO 2023.
- URBANOVA, P., JURDA, M., VOJTÍŠEK, T. & KRAJSA, J. (2017). *Using drone-mounted cameras for on-site body documentation: 3D mapping and active survey*. Forensic Science International, 52-62.
- WANG, Y. J., QIN, C. Z. & ZHU, A. X. (2019). *Review on algorithms of dealing with depressions in grid DEM*. Annals of GIS, 25(2), 83-97.
- WATSON, C. J., UELAND, M., SCHOTSMANS, E. M., STERENBERG, J., FORBES, S. L. & BLAU, S. (2021). *Detecting grave sites from surface anomalies: A longitudinal study in an Australian woodland*. Journal of Forensic Sciences, 479-490.



