

Desarrollo y Validación de una Metodología para la Cuantificación de la Erosión Hídrica a través de Fotogrametría UAS

Development and Validation of a Methodology for Quantification of the Soil Erosion through UAS Photogrammetry

Sergio Arriola-Valverde¹, Karolina Villagra-Mendoza²,
Maikel Méndez-Morales³, Natalia Gómez-Calderón⁴,
Milton Solórzano-Quintana⁵, Renato Rimolo-Donadío⁶

Arriola-Valverde, S; Villagra-Mendoza, K; Méndez-Morales, M; Gómez-Calderón, N; Solórzano-Quintana, M; Rimolo-Donadío, R. Desarrollo y Validación de una Metodología para la Cuantificación de la Erosión Hídrica a través de Fotogrametría UAS. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32 Especial. Marzo 2019. Pág 43-52.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i5.4171>



- 1 Escuela de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: sarriola@tec.ac.cr
- 2 Escuela de Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: kvillagra@tec.ac.cr
- 3 Centro de Investigación en Vivienda y Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mamendez@tec.ac.cr
- 4 Escuela de Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ngomez@tec.ac.cr
- 5 Escuela de Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: msolorzano@tec.ac.cr
- 6 Escuela de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rrimolo@tec.ac.cr



Resumen

En este trabajo se propone el desarrollo y validación de una metodología para la cuantificación de la erosión hídrica en parcelas con baja cobertura vegetal, a través de fotogrametría con sistemas aéreos no tripulados (UAS). El proceso consiste en la generación de una base histórica de modelos de elevación digital (DEM) sobre un área de estudio a partir de levantamientos fotogramétricos, la cual está relacionada espacialmente por puntos de control en sitio (GCP). Esta información se utiliza para la conformación de DEMs tipo "RASTER" desde los cuales se estiman los volúmenes desplazados de suelo a lo largo del tiempo. Dichos cálculos son totalizados a partir de un nivel de referencia para la cuantificación de los volúmenes de suelo erosionados. El artículo presenta un caso de estudio, dónde se discuten aspectos relevantes en cuanto a la toma de datos, requerimientos de los puntos de control e interpretación de los datos, alcanzándose una resolución máxima de alrededor de 1 cm/píxel.

Palabras claves

Erosión; fotogrametría; modelo de elevación digital; sistemas aéreos no tripulados (UAS).

Abstract

In this paper, the development and validation of a methodology for quantification of hydric erosion in land plots with low vegetal coverage is proposed, through photogrammetry with unmanned aerial systems (UAS). The process consists of the generation of a historical database of digital elevation models (DEM) over a study area from photogrammetric surveys, which is spatially related to on-site ground control points (GCP). This information is used for the creation of DEMs in a "RASTER" format, from which the displaced volumes of soil are estimated over time. These calculations are totalized from a reference level for the quantification of eroded/displaced soil volumes. This article presents a case study, where relevant aspects are discussed in terms of data collection, control point requirements, and data interpretation, reaching a maximum spatial resolution of about 1 cm/píxel.

Keywords

Digital elevation model; erosion; photogrammetry; unmanned aerial systems (UAS).

Introducción

Las actividades agrícolas ocasionan alteraciones a nivel físico en la estructura del suelo y debido a diversas prácticas productivas, los suelos sufren degradación con pérdida de nutrientes, remoción y contaminación [1], [2]. Los procesos de erosión son una fuente importante de degradación, y aunque son mayoritariamente de origen natural, se acentúan debido a actividades humanas que se traducen, por ejemplo, en deforestación, o modificaciones estructurales e hidrológicas del suelo [3], [4].

Debido al arrastre de sedimentos generados por procesos de erosión, en la cuenca de Río Reventazón, por ejemplo, se estima que el volumen de sedimentos alcanza entre 1 y 2 millones de toneladas por año. Estas altas tasas de deposición de sedimentos generan problemas en la generación de energía eléctrica [5]. La cuantificación de estos procesos es importante para formular planes de manejo del suelo y mitigar su impacto, sin embargo, es una tarea compleja debido a las numerosas variables que se requieren para estimar la dinámica del suelo. Se han

propuesto numerosas metodologías directas que permiten estimar la pérdida física del suelo, pero generalmente se asocian con una complejidad logística muy alta [6]. En Costa Rica, las parcelas de escorrentía constituyen una metodología de uso frecuente, sin embargo, desventajas tales como alto costo de construcción, gastos excesivos en mantenimiento, resultados con baja precisión y trabajo manual no calificado dificultan la obtención de datos confiables.

Esto ha motivado la búsqueda de otras alternativas indirectas para la cuantificación de erosión tales como la fotogrametría UAS. Con este acercamiento se crean un conjunto de modelos de elevación digital a partir de fotografías aéreas georreferenciadas para poder predecir las variaciones en la superficie del suelo con una alta resolución temporal y espacial en parcelas con baja cobertura vegetal.

Este trabajo presenta el desarrollo y validación preliminar de una metodología para cuantificación de erosión hídrica basada en fotogrametría UAS y su valoración a partir de un caso de estudio. Los volúmenes desplazados a nivel temporal se totalizan a partir de un nivel de referencia, según el inicio de la captura de la información.

Metodología para la cuantificación de la erosión

La metodología se basa en tres etapas, cuyos objetivos son la toma de datos (imágenes + información de referenciación), su procesamiento para la creación de DEMs, y su análisis a lo largo del tiempo, respectivamente. En la primera fase, se debe planificar y ejecutar la misión fotogramétrica, tomando en cuenta las condiciones ambientales, atmosféricas, topográficas y físicas del área bajo estudio, como se detalla en [7].

Según la resolución temporal definida y el número total de imágenes recolectadas en el levantamiento, mediante la aplicación de algoritmos semejantes a *SIFT* (Scale-Invariant Feature Transform) y *SfM* (Structure for Motion) con paquetes de software fotogramétricos, se conforma el histórico de modelos de elevación digital.

Para la extracción de información se aplica la técnica llamada “Difference of DEMs” (DoD) la cual permite totalizar diferencias volumétricas y mediante un proceso de reclasificación se contabiliza el volumen desplazado debido a procesos de erosión y deposición según el periodo de análisis establecido. En la figura 1 se muestra un diagrama que resume los procesos que conforman la metodología propuesta para cuantificación de erosión.

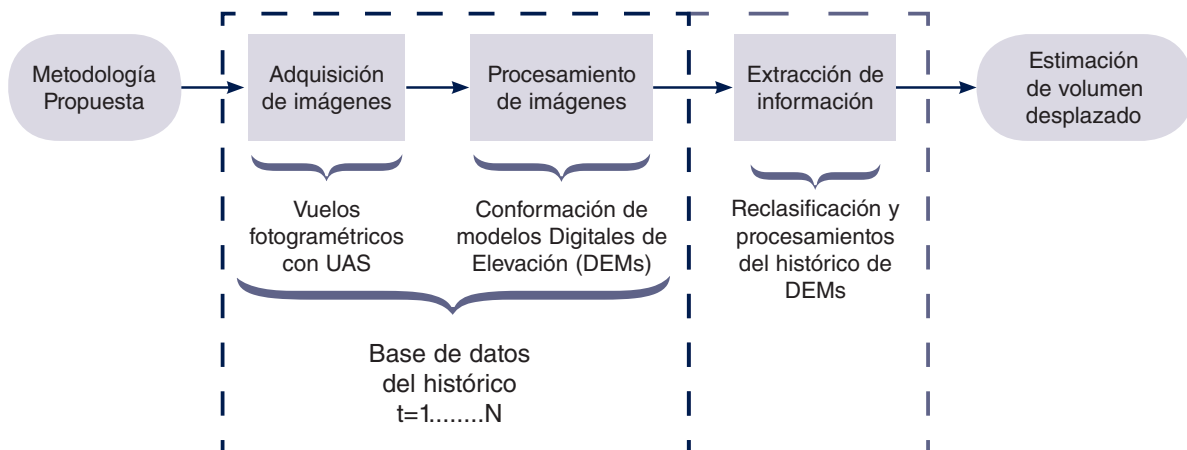


Figura 1. Metodología para la cuantificación de la erosión a través de fotogrametría UAS

Debido a que es deseable que los DEMs posean una alta resolución espacial y que deben estar referenciados entre sí, se utilizó una estación GPS-GNSS para posicionar los puntos de control en tierra, utilizando un sistema de proyección CRTM-05 incluyendo la altura ortométrica para cada punto de control mediante la ondulación respecto al geoide a través del sistema geoidal *EGM-08*. Estos puntos fueron mantenidos y verificados a lo largo del período de observación.

Aplicación de la metodología

La metodología fue aplicada en una parcela experimental, utilizando una base de datos con tres momentos de observación, como se ilustra en la figura 2. El área bajo estudio se encuentra situada en el campo de prácticas agrícolas de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica (figura 3). Para el análisis del volumen desplazado se utilizó una frecuencia de observación de entre dos y tres semanas.

Los levantamientos fotogramétricos se llevaron a cabo con un UAS comercial marca DJI, modelo Phantom 3 Profesional, el cual posee abordo un sensor de imagen pasivo RGB, marca SONY, modelo EXMOR-IMX117 de tecnología CMOS.

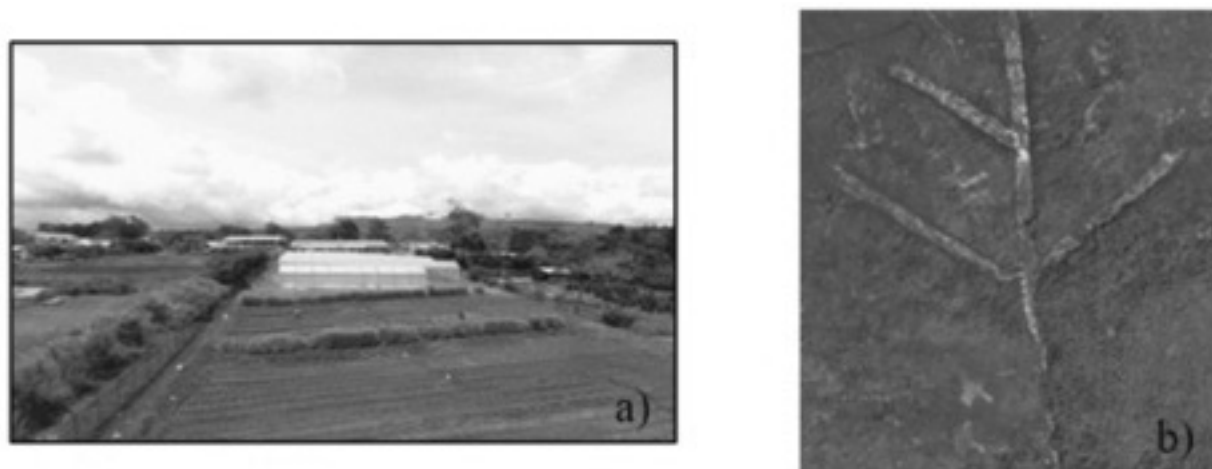


Figura 2. Campo de prácticas utilizado: a) vista aérea, b) detalle del área bajo estudio.

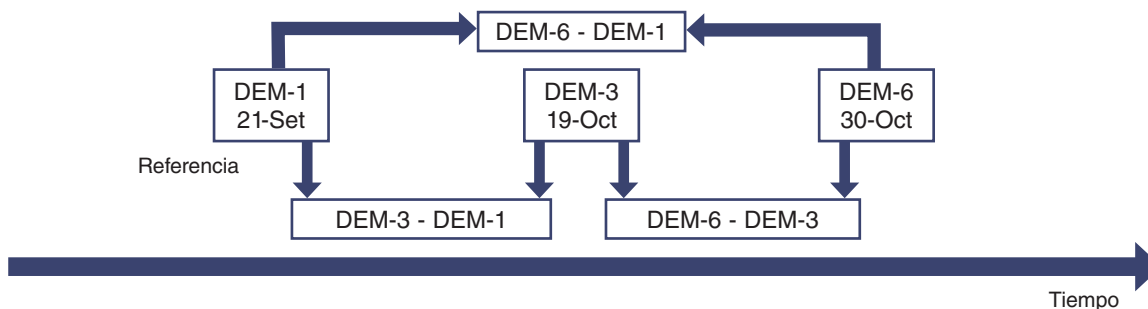


Figura 3. Puntos de muestreo del área bajo estudio y su comparación

Generación y Análisis los Modelos de Elevación Digital

Para la generación de la base datos, se utilizaron un total de 631 imágenes georreferenciadas las cuales fueron recolectadas a partir de tres vuelos fotogramétricos todos configurados a una altura de 22,5 m, 80% de traslape frontal, 81% traslape lateral, con un ISO de 200 y velocidad de obturación de 1/2500 s.

Para procesar las imágenes, se utilizó el software comercial Agisoft Photoscan Pro, versión 1.3.3, para generar las nubes densas de puntos para cada levantamiento fotogramétrico. Para la conformación de los DEMs, el software fotogramétrico utiliza un método de interpolación *IDW*. Se obtuvo una resolución espacial de 1,13 cm/píxel. En la figura 4 se muestran los DEMs generados para los seis momentos de observación.

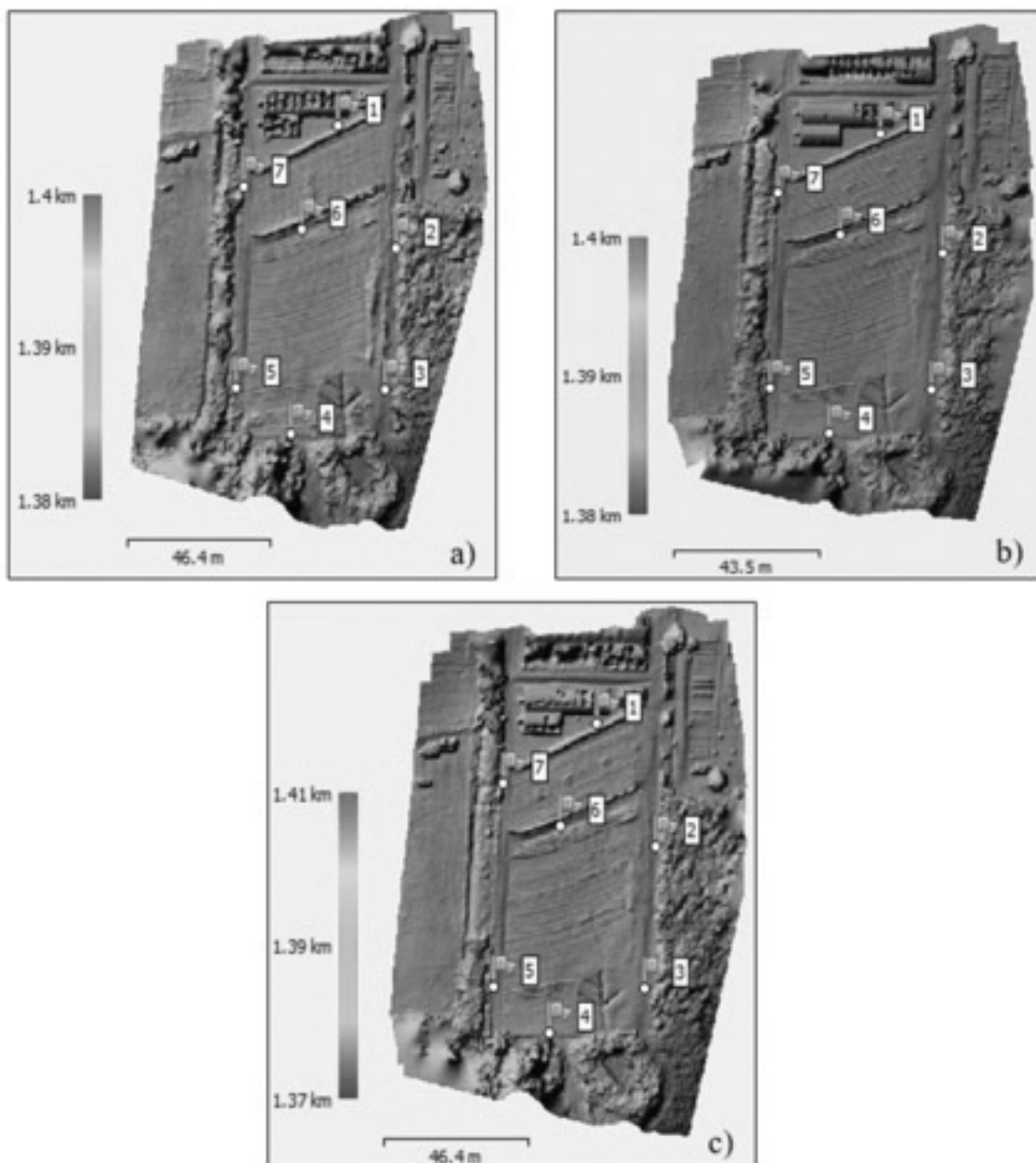


Figura 4. Modelos de elevación digital para diferentes fechas: a) DEM-1 21-Set, b) DEM-3 19-Oct, c) DEM-6 30-Oct.

Se utilizaron tres puntos de control en tierra como orientación externa para georreferenciar cada modelo de elevación digital. Los puntos de control en tierra fueron posicionados con una estación GPS-GNSS marca Leica, modelo GS-14, utilizando el sistema de proyección CRTM-05, en modo postproceso con una duración de 5 minutos por cada punto de control. Para asegurar la calidad de los puntos de control se realizaron tres mediciones de manera mensual, identificando una deformación espacial máxima de 2,29 cm en la vertical. En el cuadro 1 se muestran la medición de los puntos de control en diversos lapsos temporales.

Cuadro 1. Análisis de la variabilidad de los puntos de control

ID	24 mayo a 29 setiembre			29 setiembre a 26 octubre		
	Δx (cm)	Δy (cm)	Δz (cm)	Δx (cm)	Δy (cm)	Δz (cm)
1	0,69	-0,31	-0,74	-0,17	0,32	1
2	0,44	-0,21	-0,37	-0,26	0,54	-0,27
3	-0,13	0,54	0,55	0,05	-0,26	-0,87
4	-0,52	-1,72	0,94	0,53	1,35	-1,72
5	0,44	-0,05	-0,27	-0,24	-0,15	0,83
6	0,15	-0,56	-1,75	-0,09	0,01	0,52
7	-0,17	0,09	-2,29	0,50	-0,28	1,64

En cuanto a la precisión de los DEMs se obtuvo un valor RMSE promedio en la vertical de 1,103375 cm, siendo dicho resultado aceptable en comparación a la resolución espacial de aproximadamente 1 cm/pixel. En el cuadro 2 se muestran los valores RMSE obtenidos para cada DEM.

Cuadro 2. Errores RMSE asociados a los puntos de control utilizados en los DEMs

GCP (ID)	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	
1	0,006	0,171	0,013	0,171	DEM 1 – 21 set.
4	-0,024	0,089	0,004	0,004	
6	0,018	-0,260	-0,017	0,261	
GCP (ID)	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	
1	-0,018	0,190	0,011	0,191	DEM 3 – 19 oct.
4	-0,040	0,095	0,003	0,103	
6	0,059	-0,285	-0,014	0,291	
GCP (ID)	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	
1	-0,004	0,112	0,007	0,113	DEM 6 – 30 oct.
4	-0,020	0,057	0,002	0,060	
6	0,024	-0,169	-0,009	0,172	

Cuantificación de erosión

Para la comparación de la información se aplicó un remuestreo a todos los DEMs para definir un área y resolución espacial comparables para cada RASTER. El remuestreo se configuró con una resolución espacial de 1,13 cm/píxel (la más baja entre el histórico de DEMs), un método de interpolación de tipo bicúbico y las coordenadas geográficas del área bajo estudio.

Para la obtención de volúmenes desplazados a lo largo del tiempo, se utilizó el histórico de DEMs remuestreados, y mediante la técnica "Difference of DEMs" (DoD) se obtuvo un conjunto de mapas RASTER en unidades volumétricas. Debido a la presencia de cobertura vegetal, se aplicó un nivel umbral para la detección en la vertical considerando la deformación espacial de los puntos de control en tierra y el valor RMSE de la georreferencia en los DEMs. Esto significa que la cobertura vegetal fue removida de manera parcial; sin embargo, se dan falsos positivos por cobertura vegetal con umbrales semejantes a los removidos/depositados del suelo. En la figura 5 se muestran los mapas comparativos RASTER, luego de haber aplicado un proceso de reclasificación y establecimiento de un nivel de detección para un detalle del área bajo estudio en el que se formaron canales por erosión.

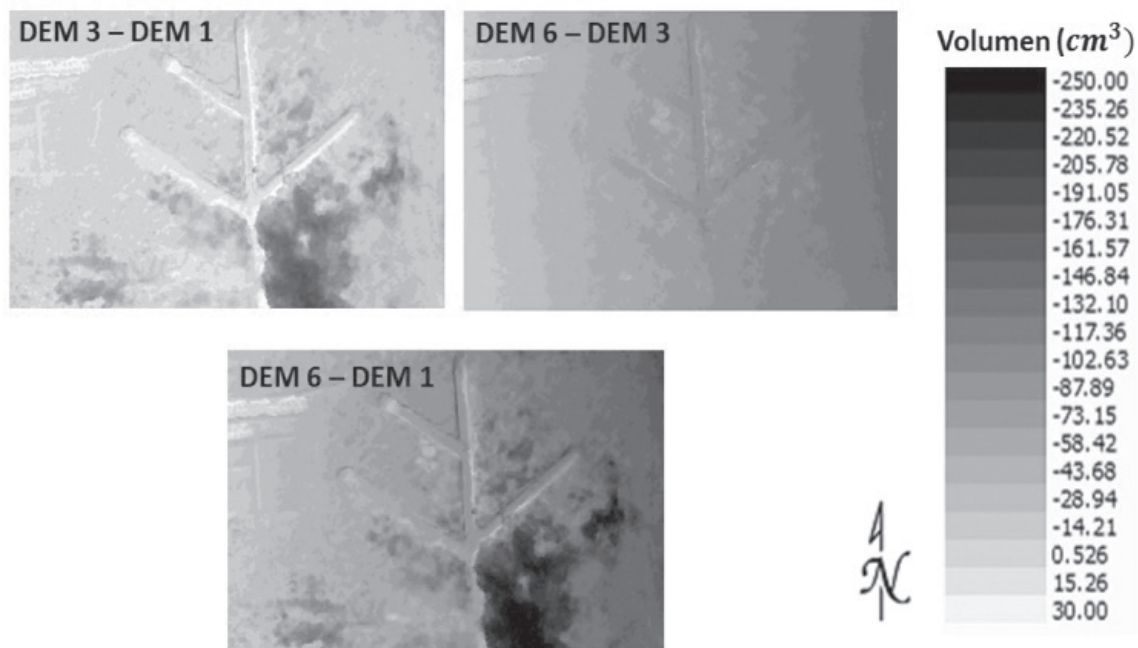


Figura 5. Estimación de procesos de deposición y erosión con un periodo de observación semanal (volúmenes positivos denotan deposición y negativos erosión)

Para la estimación volumétrica de erosión se utilizó el software SIG ILWIS, el cual permitió totalizar el volumen de deposición y erosión, y además calcular la tasa de pérdida de suelo (ton/ha/semana) a partir de la densidad aparente de suelo, definida en 1,3 g/cm³. En la figura 6 se muestran las tasas de erosión y deposición entre diferentes puntos de observación utilizados.

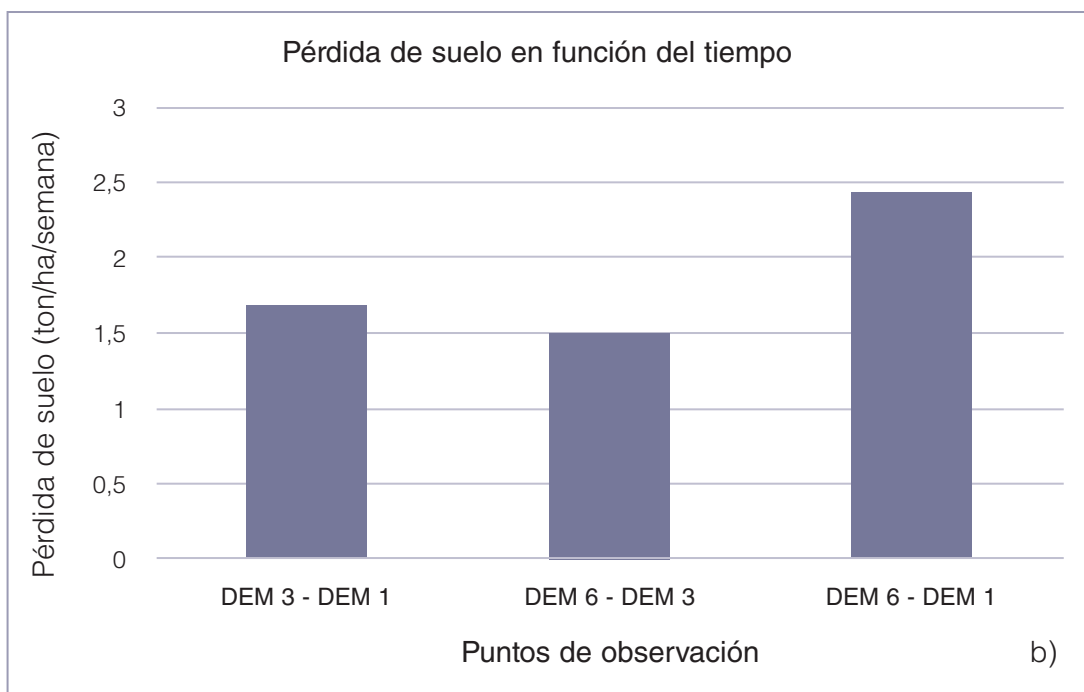
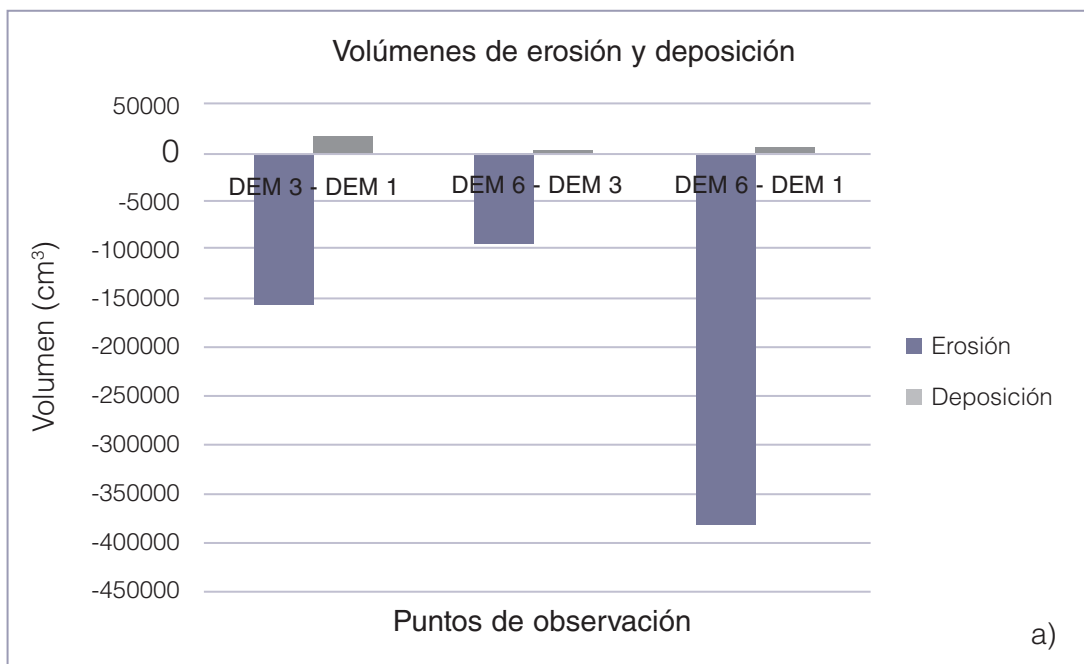


Figura 6. Totalización de: a) erosión y deposición, b) pérdida de suelo.

Con base a las figuras 5 y 6, se evidencia deposición y erosión entre las diferentes tomas de datos de las cuales los resultados se correlacionan con ayuda de los ortomosaicos para punto de observación. Para el periodo de observación de (DEM 3 – DEM 1), se totalizó un volumen desplazado de aproximadamente 157568,3104 cm³, dentro del cual la mayoría de ese volumen se aproxima a en valores cercanos a los 190 cm³ por pixel. Esto corresponde a una altura promedio de 112 cm. No obstante, al interior del canal en la parte central se totalizan volúmenes cercanos a los 0,526cm³ lo que corresponde a variaciones de altura muy pequeñas. En el

exterior del canal se totalizaron volúmenes cercanos a $14,21\text{cm}^3$ debido a escorrentía, entre otros factores externos.

Durante el periodo de observación (DEM 6 – DEM 3), se visualizó una disminución de los volúmenes depositados y desplazados. Esto se atribuye a que en estos puntos de observación no se dieron cortes de cobertura vegetal alrededor del área de estudio, ya que estos cortes de coberturas implican cambios abruptos de altura entre periodos de observación. No obstante, se totalizó un volumen desplazado dentro del canal de $58,42\text{ cm}^3$. Cabe resaltar que este volumen de suelo es trasladado hacia la parte inferior del canal debido a la escorrentía y precipitaciones durante el periodo de estudio. Se evidenció que la totalización de este volumen en gran medida se encuentra a un extremo debido a la pendiente que tiene el terreno, donde se totalizaron volúmenes depositados de $0,526\text{ cm}^3$.

Para la tasa de pérdida totalizada (DEM 6 – DEM 1), se identifica una pérdida total de $2,5\text{ ton/ha/semana}$, pero con una tasa menor debido a las modificaciones del área durante el curso de observación, que incluyen mecanizaciones y cortes de maleza. Si bien las variaciones en la cobertura vegetal pueden alterar la cuantificación y su tratamiento se debe depurar, se observa que la metodología es capaz de detectar variaciones temporales en la estructura superficial del canal como objeto de estudio y se logra asociar con tasas de erosión y deposición en el área bajo estudio.

Conclusiones

La metodología desarrollada en este trabajo posibilita la cuantificación de erosión a partir de una base de datos histórica de modelos de elevación digital con alta resolución espacial y temporal a través del empleo de fotogrametría UAS.

Mediante el empleo de un sistema UAS comercial con un sensor de imagen abordo, se logró realizar levantamientos a una altura de $22,5\text{ m}$, con 211 imágenes georreferenciadas por cada misión, con un traslape frontal y lateral del 80%. La sistematización de los vuelos fotogramétricos permitió conformar un histórico de DEMs para una parcela experimental con una resolución espacial máxima de $1,3\text{ cm/pixel}$, y un error RMSE comparable ($1,103\text{ cm}$ en la vertical), a partir del procesamiento de los productos utilizando herramientas SIG.

La observación entre diversos periodos permitió evidenciar cambios físicos sobre el área de estudio siempre y cuando exista una baja cobertura vegetal, los cuales son consistentes con eventos climáticos y acciones de mecanización sobre el terreno. La utilización de GCP es un aspecto que requiere especial atención y la precisión en invariabilidad en el tiempo de dichos puntos es un aspecto crítico. Otro reto es la separación de la cobertura vegetal sobre los cálculos de deposición y erosión, lo cual se debe considerar en trabajos futuros. Asimismo, los resultados con esta metodología deben ser comparados a futuro con los obtenidos a partir de técnicas directas, para poder establecer una base comparativa con respecto a métodos tradicionales.



Referencias

- [1] J. Gaitán-Álvarez, «Evaluación de erosión hídrica en suelos bajo cobertura forestal y agrícola, en la Cuenca del Río Reventazón, Costa Rica.», 2013.
- [2] L. del Valle Neder, J. Busnelli, y M. M. Sampietro Vattuone, «Incremento de erosión y suelos degradados por acciones antropogénicas y variaciones climáticas, Tucumán», *Rev. Asoc. Geológica Argent.*, vol. 66, n.o 4, pp. 499–504, 2010.
- [3] R. Pizarro, C. Morales, L. Vega, R. Valdés, C. Olivares, y F. Balocchi, «Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central», *Aqua-Lac*, vol. 2, n.o 2, pp. 1–11, 2010.
- [4] M. Ruiz-Colmenero, R. Bienes, D. J. Eldridge, y M. J. Marques, «Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain», *Catena*, vol. 104, pp. 153–160, 2013.
- [5] Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). «Postulación al Reconocimiento a Prácticas Promisorias en la Gestión Pública». Instituto Costarricense de Electricidad., p. 58. 2011.
- [6] S. Arriola. «Methodology to Determine Dynamic Displaced Soil Volume Through Photogrammetry with Unmanned Aerial Systems». Tesis de Maestría en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2018.
- [7] L. Brenes-González, S. Arriola-Valverde, K. Villagra-Mendoza, N. Gómez-Calderón, M. Solórzano-Quintana, y R. Rimolo-Donadio, «Generación de Modelos de Elevación Digital con Fotogrametría UAS» Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, San José, Costa Rica, junio 5-7, 2018.