

Estimación del volumen pluvial captado por cubiertas usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): estudio de caso

Estimation of rainfall volume captured by roofs using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a case study

Oscar Abel Vergara-Leyes¹, Daner Jesús Julian-Vargas²,
Andrea Villarroel-Rocabado³, Javier Vicente Ruiz-Rivero⁴, Oscar
Mauricio Áviles-Jimenez⁵, Nahúm Gamalier Cayo-Chileno⁶

Fecha de recepción: 3 de mayo, 2023
Fecha de aprobación: 7 de octubre, 2023

Vergara-Leyes, O.A.; Julian-Vargas, D.J.; Villarroel-Rocabado, A.; Ruiz-Rivero, J.V.; Áviles-Jimenez, O.M.; Cayo-Chileno, N.G. Estimación del volumen pluvial captado por cubiertas usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): estudio de caso. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 121-133.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6708>

- 1 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: overgaral@univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-4473-6688>
- 2 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: jvd0029656@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0009-0006-9626-7499>
- 3 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: vra5001469@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0009-0001-1543-7585>
- 4 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: rj0026867@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-2714-6774>
- 5 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: oavilesj@univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-3182-1015>
- 6 Universidade Federal de Lavras. Brasil.
Correo electrónico: nahum.cayo.chileno@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4350-1174>

Palabras clave

Almacenamiento de agua; control automático; precipitación; procesamiento de datos; techo; UAV.

Resumen

En los últimos años, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) han presentado una variedad de aplicaciones. Estudios recientes demuestran sus ventajas al momento de cuantificar áreas para la estimación de escorrentía pluvial. Sin embargo, existen incertidumbres sobre su alcance real. Ante ello, el objetivo del estudio es estimar el volumen pluvial captado por cubiertas mediante VANT. La metodología consistió en seleccionar una zona de estudio compuesta por una variedad de cubiertas, en el que las áreas fueron medidas digitalmente, esta última por medio del procesamiento de imágenes captadas por VANT. Para el cálculo de volumen de escurrimiento, se tomaron los datos de precipitación media mensual de los últimos 11 años, y se consideraron los Coeficientes de Escorrentía (C_e) reportados en la literatura. A continuación, se calculó el volumen de escurrimiento medio mensual para cada cubierta. Los resultados muestran que las cubiertas estudiadas (Coliseo - Biblioteca), tienen la capacidad de captar un volumen anual de 2237.75 m³. Con un volumen promedio de 406.74 m³ durante la época lluviosa (noviembre a marzo) y 29.15 m³ en la época seca (abril a octubre). Aunque el uso de VANT permite determinar uno de los valores dentro del cálculo de volumen de escorrentía, para lograr un resultado más exacto, es preciso analizar y evaluar las otras variables (C_e y precipitación).

Keywords

Automatic control; data processing; precipitation; roof; UAV; water storage.

Abstract

In recent years, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have presented a variety of applications. Recent studies show their advantages when quantifying areas for storm runoff estimation. However, there are uncertainties about their actual range. Therefore, the objective of this study was to estimate the volume of rainfall captured by roofs using UAVs. The methodology consisted of selecting a study area composed of a variety of canopies, in which the areas were digitally measured, the latter by processing images captured by UAV. For the calculation of runoff volume, the average monthly precipitation data of the last 11 years were taken, and the Runoff Coefficients (C_e) reported in the literature were considered. Then, the mean monthly runoff volume was calculated for each canopy. The results show that the roofs studied (Coliseum - Library) have the capacity to capture an annual volume of 2237.75 m³. With an average volume of 406.74 m³ during the rainy season (November to March) and 29.15 m³ during the dry season (April to October). Although the use of UAV allows determining one of the values within the runoff volume calculation, in order to achieve a more accurate result, it is necessary to analyze and evaluate the other variables (C_e and precipitation).

Introducción

La importancia del uso del agua deriva en el sustento de los sectores sociales y económicos, ya que se presenta como la base fundamental de los recursos naturales, de los cuales depende el mundo [1]; sin embargo, debido a la sobreexplotación y a los efectos del cambio climático, este recurso se considera en estado de estrés hídrico crítico [2]–[4]. Debido a ello, se desarrollan

prácticas para el correcto aprovechamiento del agua, como es el caso de la colecta del agua pluvial [5], la cual resulta como alternativa viable incluso para zonas urbanas [6], ya que su adecuado almacenamiento permite su utilización en actividades del día a día (trabajos de limpieza, lavado de autos, recarga de inodoros, etc.) [7].

Esta idea es sostenida por estudios realizados en espacios institucionales, como es el caso de la Universidad del Valle sede Meléndez, Colombia [8], Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia [9], Universidad Peruana los Andes [10], entre otras, que demuestran una relación entre el aprovechamiento hídrico y los sistemas de captación de agua de lluvia, particularmente, cubiertas. Debido a que las instituciones cuentan con los planos de las infraestructuras, la estimación del volumen pluvial no representa un factor de gran complejidad. Sin embargo, la carencia de estos datos implica la búsqueda y evaluación de métodos que permitan su obtención, sin que estos involucren un alto costo de inversión.

Tradicionalmente la toma de dimensiones de infraestructuras civiles es realizada por medio de instrumentos topográficos [11]. Este trabajo conlleva un mayor tiempo y costo de operación [12] en relación con las nuevas tecnologías emergentes. Tal es el caso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), los cuales se caracterizan por ingresar a lugares de difícil acceso para el ser humano [13], [14]. Entre otras ventajas, Inzerillo et al. [15] y Romero-Chambi et al. [16], resaltan la rápida adquisición de datos, información de la superficie estudiada e imágenes de alta calidad. Además, mediante el procesamiento de datos obtenidos por medio de un plan de vuelo en condiciones favorables (altura, horario, velocidad de vuelo, entre otros), es posible lograr mediciones adecuadas al área de estudio [17], [18].

No obstante, muchas de estas ventajas están limitadas a las características técnicas del VANT. En investigaciones pasadas se puede observar que la estimación del volumen pluvial es alcanzada desde levantamientos fotogramétricos [19] hasta análisis multiespectrales [20]. A pesar de ello, aún existe la incertidumbre sobre la aplicabilidad práctica de estos equipos, siendo un tema actualmente estudiado en la Ingeniería Civil. Por tal motivo, el objetivo del artículo es estimar el volumen pluvial captado por cubiertas, mediante el levantamiento fotogramétrico realizado con VANT dentro de la Universidad Privada del Valle.

Metodología

Para alcanzar el objetivo de la presente investigación, se plantearon 3 etapas. En la primera se llevó a cabo la selección y descripción del área de estudio. La segunda etapa comprendió la recolección de datos digitales por medio de VANT, mismas que fueron procesadas a través de la secuencia de pasos que deriva en añadir las imágenes tomadas, alinearlas, construir la nube de puntos, generar el modelo en mosaico, modelo digital de elevación y, finalmente, el ortomosaico. Paralelamente, se descargaron los datos de precipitación de la estación meteorológica más próxima. Por último, en la tercera se realizó el cálculo de coeficientes de escurrimiento y volumen pluvial captado.

Fase I

Descripción del área de estudio

El área de estudio identificado pertenece a la Universidad Privada del Valle, la cual se ubica en la ciudad de Tiquipaya-Cochabamba, Bolivia (Figura 1). Esta es seleccionada por presentar una variedad de cubiertas estructurales, además de contar con los permisos solicitados por la Dirección General de Aeronáutica Civil [21], al momento de operar un plan de vuelo con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs).



Figura 1. Ubicación de las cubiertas estudiadas.

Fase II

Adquisición y análisis de datos

La toma de datos digitales fue realizada con el VANT Phantom 4 Pro de la marca DJI, cuyas características técnicas se presentan en el Cuadro 1, equipo utilizado en numerosas investigaciones por las ventajas que este presenta al momento de operar y configurar un plan de vuelo [22], [23].

Cuadro 1. Características del Phantom 4PRO.

Especificaciones	DJI Phantom 4 Pro
Peso	1388 g
Tiempo máximo de vuelo	Aproximadamente 30 min (por batería)
Capacidad de visión del sistema	Delantera
	Trasera
	Hacia abajo
Sensores de detección de obstáculos	Delantera
	Trasera
	Derecha
	Izquierda
Sensores de cámara de 1" CMOS con píxeles efectivos	20 M
Resolución máxima de video	4K 60P

La toma de imágenes fue realizada con el programa DroneDeploy, para lo que se utilizó la versión libre, la cual permite generar vuelos remotos horizontales, calcular el tiempo y la ruta de vuelo del área seleccionada. Los parámetros de vuelo fueron configurados en base a valores identificados en la literatura: superposición longitudinal y transversal (75%), altura de vuelo (40 m) y velocidad de vuelo (3 m/s) [25], [17]. Adicionalmente, se desactivaron las opciones Live Map HD y 3D Mejorado, ya que el resultado esperado es un ortomosaico con vista de planta.

Para cubrir el área seleccionada se empleó un total de 3 baterías. El plan de vuelo fue realizado en el rango de las 11:00 a 13:00 horas, el cual es reportado por Rocha et al. [17], Ruiz et al. [26] y Fernández-Dávalos et al. [27] como periodo recomendado para la toma de imágenes. Posteriormente, las imágenes tomadas fueron procesadas por medio del software Pix4D Mapper Enterprise, programa empleado en distintas investigaciones al momento de generar una alineación de imágenes, reconstrucción del Modelo Digital de Elevación (DEM) y generación del ortomosaico [22], [23].

A continuación, se realizó la selección aleatoria de 2 cubiertas, viendo de que estas presenten una diferencia en el material usado (teja/calamina). Para tomar las dimensiones, se optó por usar el software Global Mapper V18, el cual por medio de la herramienta create feature, permite obtener los valores de perímetro y área del polígono dibujado (Figura 2).

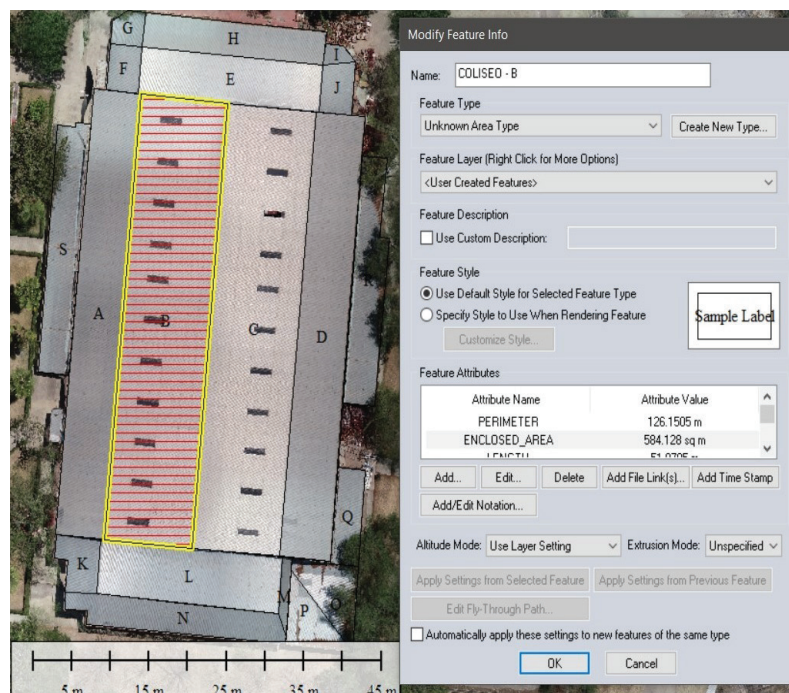


Figura 2. Medición de área de cubierta.

Recolección de datos de precipitación

Para el presente estudio se consideraron los datos de precipitación media mensual de los últimos 11 años (1 de enero de 2012 al 31 de diciembre del 2022). Si bien la institución cuenta con una estación meteorológica automática, esta entra en funcionamiento regular a partir del 1 de agosto del 2022, por lo que la información recolectada es insuficiente. Debido a ello, se opta por usar los datos de la estación meteorológica más próxima al área de estudio, la cual corresponde a “La Violeta”, ubicada a una distancia menor a los 3 km. La información de la estación es presentada en el Cuadro 2, mientras que los datos fueron extraídos de SENAMHI [28].

Cuadro 2. Datos de la estación meteorológica La Violeta.

Descripción	Datos generales
Latitud	-17.347222
Longitud	-66.231667
Altura	2614 msnm
Fecha inicio de operación	31 de Dic de 1978
Fecha fin de operación	Activo

Fuente: Modificado en base a SENAMHI [29]

Fase III

Cálculo del volumen de escurrimiento

Dentro del cálculo del volumen de escurrimiento, es prudente considerar el valor de precipitación, área de la superficie y particularmente el coeficiente de escurrimiento (C_e), siendo este último la propiedad superficial característica de los materiales.

Coefficiente de escurrimiento

Martínez de Azagra – Paredes [30], señala que los valores del C_e varían dentro del rango de 0 a 1 cuando el valor es 1 todo lo que precipita escurre y, si el valor será 0, todo lo precipitado es retenido. Para su cálculo se empleó la Ecuación (1) propuesta por Monsalve Sáenz [31].

$$C_e = \frac{E}{P} \quad (1)$$

Donde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento, adimensional 0 a 1.

E = Escurrimiento expresado en lámina, mm.

P = Precipitación, mm.

Por otra parte, numerosas investigaciones ya proporcionan una aproximación del valor de C_e en relación con el material, por lo que en el presente estudio se considera 0.8~0.9 (teja) y 0.9 (metal) [32]–[34].

Volumen de escurrimiento

Para el cálculo del volumen de escurrimiento se empleó la Ecuación (2) [35].

$$V_{jk} = C_e * A_{Total} * P_m \quad (2)$$

Donde:

V_{jk} = Volumen medio mensual potencial a captar, m³.

C_e = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional.

A_{Total} = Área total de captación, m².

P_m = Precipitación media mensual, m.

Resultados y discusiones

Áreas de escurrimiento

En la Figura 3, se presentan las cubiertas seleccionadas, mismas que fueron divididas en secciones para asegurar la exactitud del área (Cuadro 3). Debido a la falta de personal capacitado, no se realizó una medición In Situ; sin embargo, investigaciones previas demuestran la viabilidad al momento de cuantificar los valores del área estudiada, Fernández-Dávalos et al. [27] identifican errores en el rango de 2.75% al 9% para un plan de vuelo a 40 m, mientras que, Rocha et. al. [17] presenta resultados con un error promedio de 1.42%, bajo condiciones ideales de vuelo (altura de vuelo 20m, horario de vuelo entre las 10 y 12hrs) y, Lima et al. [12] reporta un error del 0.71% (altura de vuelo 50 metros, con puntos de control). La variación es reportada en la literatura, ya que en muchas ocasiones esta es generada a causa de las características del sitio a evaluar [36].

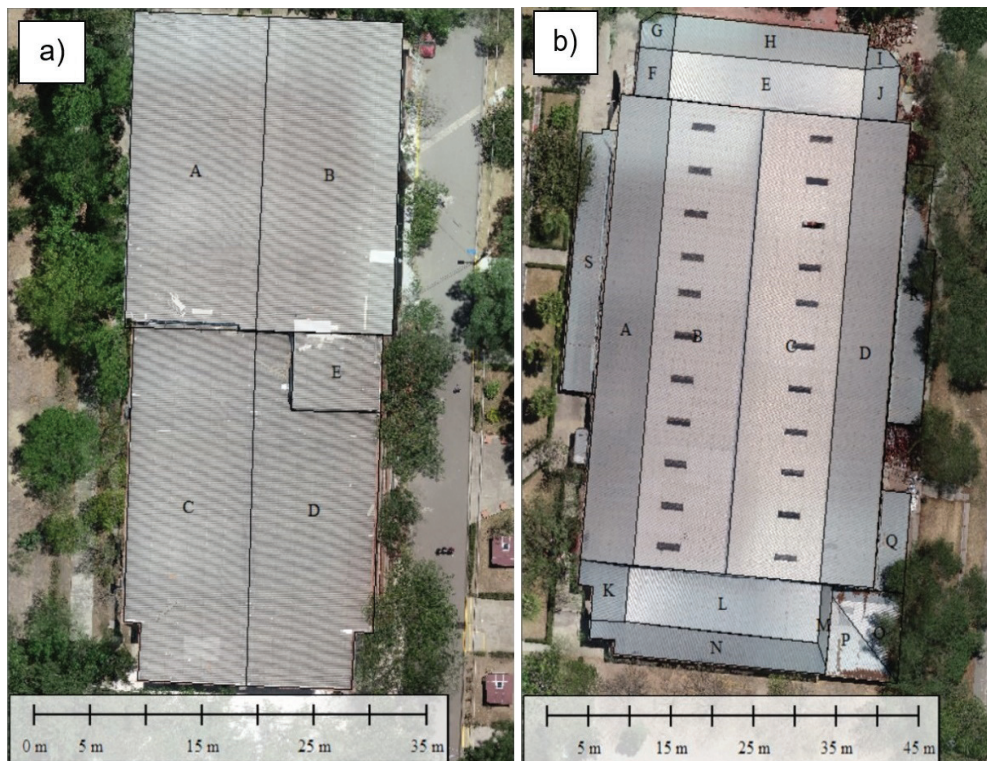


Figura 3. Vista aérea de Cubiertas seleccionadas a) Biblioteca y b) Coliseo.

Cuadro 3. Áreas de escurrimiento.

Cubierta	Material	Sección	Área (m ²)	Sumatoria (m ²)
Biblioteca	Teja	A	327.13	1321.07
		B	328.20	
		C	330.05	
		D	283.78	
		E	51.91	
Coliseo	Calamina	A	323.62	2773.85
		B	584.13	
		C	590.49	
		D	333.69	
		E	128.73	
		F	22.34	
		G	15.51	
		H	93.61	
		I	6.99	
		J	24.39	
		K	31.20	
		L	151.94	
		M	9.81	
		N	96.51	
		O	49.18	
P	38.37			
Q	40.62			
R	112.34			
S	120.38			

Precipitación media mensual

En la Figura 4 se presenta el promedio de la precipitación mensual en el periodo de 11 años. Siendo este valor para la época lluviosa (noviembre a marzo) de 114.47 mm y para la época seca (abril a octubre) de 8.20 mm. Mientras que, la precipitación promedio por año es de 52.50 mm.

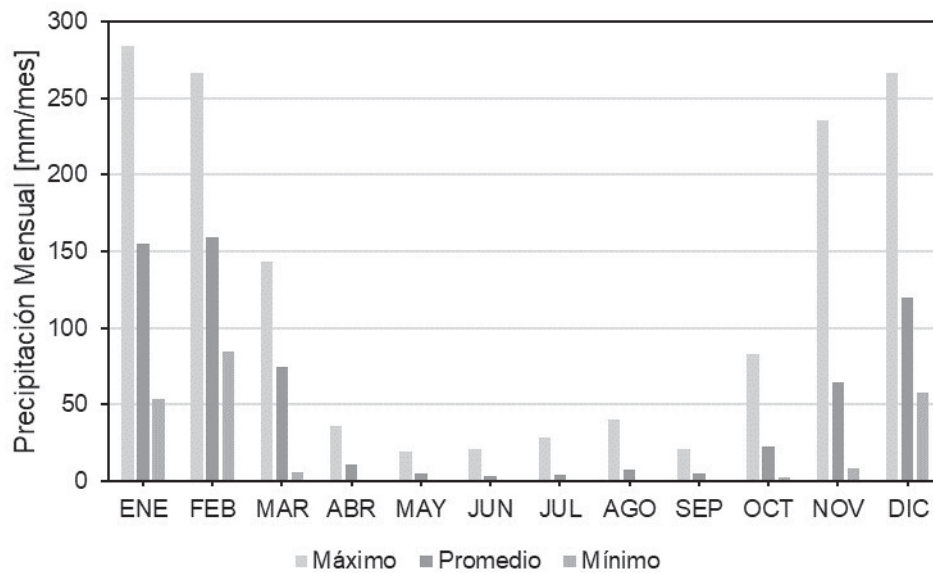


Figura 4. Precipitación promedio mensual.

La literatura recomienda trabajar con el valor promedio mensual [8], [9]. Sin embargo, Ruiz Mendoza [10], indica que es de importancia considerar a los valores máximos históricos para lograr un óptimo diseño estructural (tanque). En el presente estudio, los valores históricos corresponden al mes de enero del año 2014 con una precipitación total de 284.20 mm, mientras que, el total anual corresponde al año 2018, con una precipitación de 940 mm. Debido a que la finalidad del estudio es cuantificar el volumen de escurrimiento captado por cubiertas, por medio de VANT, el trabajo se limitó a realizar el análisis de periodos de retorno, puesto que, no se pretende lograr un diseño de tanque estructural.

Por otra parte, Aksu y Akgül [37] señalan que la información meteorológica es deficiente en muchas zonas del mundo. Por lo que, Toté et al. [38] y Dinku et al. [39] consideran a los datos captados por satélites como una alternativa; sin embargo, debido al gran número de proveedores, es necesario realizar un proceso multicriterio para seleccionar al más apropiado. La investigación desarrollada por Le Noir et al. [40], indica que el producto satelital CHIRPS (resolución 4.8 km) resulta en la mejor opción al momento de requerir datos de precipitación para la ciudad de Tiquipaya-Cochabamba, Bolivia. A pesar de ello, el área de estudio del presente trabajo cuenta con una estación meteorológica física a una distancia no mayor a los 3 km, motivo por el cual se desconsideraron los datos satelitales.

Volumen de escurrimiento medio mensual

En la Figura 5, se pueden observar los valores del volumen de escurrimiento medio mensual. Durante la época lluviosa (noviembre a marzo), las cubiertas del Coliseo (metal) y la Biblioteca (teja), captaron un volumen promedio de 285.76 m³ y 120.98 m³, mientras que en la época seca (abril a octubre), los valores son de 20.48 m³ y 8.67 m³, respectivamente.

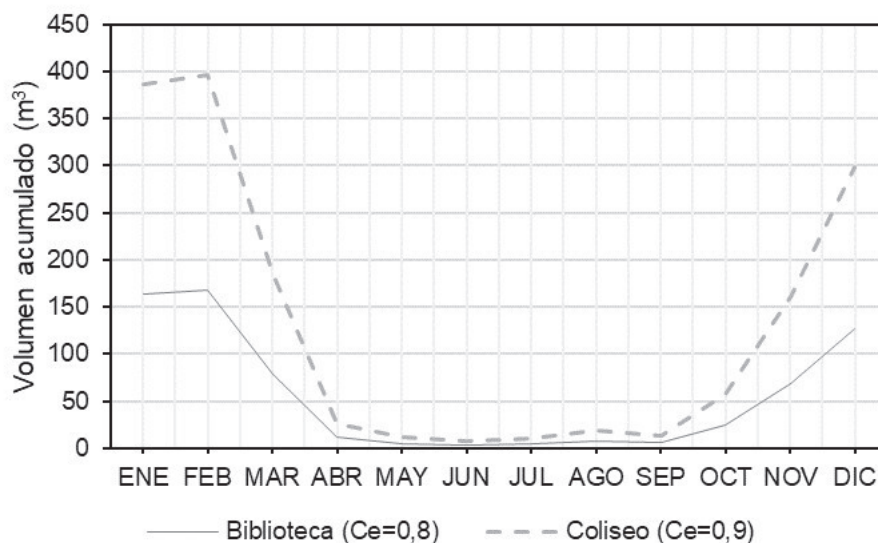


Figura 5. Volumen de escurrimiento medio mensual.

Bajo los valores de precipitación media mensual, se puede señalar que, durante toda una gestión anual la cubierta del Coliseo (con $Ce=0.9$) puede captar un volumen total de 1572.18 m³; mientras que, la Biblioteca (con $Ce=0.8$) escurre un total de 665.57 m³. Sin embargo, este último valor llega a ser variable, ya que la literatura reporta una variación del Ce (para la teja) entre 0.8~0.9. Si el valor es calculado con un $Ce=0.9$, la diferencia es de 83.20 m³, es decir, este escurre 62.98 litros de más por metro cuadrado. Ante lo observado, es recomendable determinar el Ce del material por medio de la ecuación presentada por Monsalve Sáenz [31], de esta manera, el cálculo del volumen de escurrimiento será más preciso.

No obstante, Rojas Marmolejo [35] indica que existen otros factores que llegan afectar al cálculo de esorrentía, como es el caso del grado de impermeabilización del material, intensidad de la lluvia y la pendiente de la superficie. Siendo este último de notable importancia, ya que el valor del área observada desde una imagen vista en planta, varía con relación al área real. El estudio realizado por Amisse et al. [41], demuestra la posibilidad de obtener el valor de áreas inclinadas con un error variable entre 0.21~0.60%, no obstante, para lograr el resultado reportado, se requiere generar un plan de vuelo con la opción 3D Mejorado.

En cuanto al valor anual, el volumen captado por la cubierta del Coliseo y la Biblioteca (con $Ce=0.8$), es de 2237.75 m³. Cifra que no puede ser considerada al momento de diseñar una estructura de almacenamiento. Por lo que, Henao Cárdenas y Castaño Arango [9], recomiendan realizar un diseño de reservorio para cada cubierta, analizando la oferta y demanda de agua solicitada por los servicios que brinda la infraestructura (lavamanos, inodoros, etc). Adicionalmente, la literatura reporta como estudio complementario el análisis físico químico del agua de lluvia. Aun cuando este no es potable, requiere cumplir con parámetros solicitados por diversas normas internacionales [42]–[44].

Conclusiones

El presente estudio de caso empleó un plan de vuelo con VANT para recopilar imágenes de alta resolución de un complejo de estructuras, que posteriormente fueron utilizadas para generar un ortomosaico de vista en planta. Con la ayuda del software GlobalMapper se logró cuantificar el

área de las cubiertas seleccionadas, cifra que en muchas investigaciones conlleva un mayor tiempo y costo de operación. Esta metodología demuestra la utilidad de los VANTs al momento de estimar el volumen de escorrentía captado por cubiertas.

En cuanto al Ce, se consideraron los valores reportados en la literatura; sin embargo, es recomendable realizar la determinación de este valor por medio del proceso experimental presentado por otros autores. Ya que, a través del análisis realizado en la cubierta de teja, se logró observar una diferencia de hasta 62.98 litros por metro cuadrado.

Con respecto al periodo de datos de precipitación, estos corresponden a los últimos 11 años de la estación meteorológica más cercana (La Violeta). No obstante, investigaciones previas señalan que, en el mundo, existen zonas que presentan una deficiencia en la cobertura en espacio y tiempo de datos meteorológicos. Por lo que, una alternativa resulta en la obtención de datos a través de satélites.

Si bien es posible identificar una variedad de usos para el agua de lluvia captada por cubiertas, es necesario realizar un análisis de las normativas que caracterizan sus propiedades fisicoquímicas. Por otra parte, si se considera el diseño estructural de un reservorio, es preciso contar con datos de la oferta y la demanda del agua solicitada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Valle y reconocen el apoyo recibido por parte de la Dirección Nacional de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, y el Departamento de Arquitectura y Urbanismo.

Referencias

- [1] UNESCO, "Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015," 2017. [En línea]. Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa
- [2] Y. Carvajal Escobar, "Tendencias en la formación en ingeniería del agua en América Latina," en *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, no 7, pp. 84-93, 2008.
- [3] R. D. Brenes Loria, R. E. Aguilar Álvarez, J. F. Aguilar Pereira, A. Torres Leitón, M. G. Blanco Barrientos, y D. Hernández Alvarado, "Implementación de sistema Automático de Monitoreo para Proyecto de Cosecha de Agua en Monteverde," *Ingeniería*, no 31, pp. 157-162, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/ri.v31i0.48008>
- [4] France24, "Naciones Unidas advierte del riesgo "inminente" de una crisis mundial de agua," 2023. [En línea]. Available: <https://www.france24.com/es/medio-ambiente/20230322-naciones-unidas-advierte-del-riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-de-agua>
- [5] E. Sánchez Almodóvar, J. Martí Talavera, y J. Olcina Cantos, "Buenas prácticas en el manejo y gestión del agua pluvial. Casos de estudio en la comarca del Bajo Segura," *cuadgeo*, vol. 61, no 1, pp. 229-250, 2022. doi: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.21086>
- [6] R. Hofman-Caris, C. Bertelkamp, L. de Waal, T. Van den Brand, J. Hofman, R. Van Der Aa, y JP. Van Der Hoek, "Rainwater Harvesting for Drinking Water Production: A Sustainable and Cost-Effective Solution in The Netherlands?," *Water*, vol. 11, no 3, p. 511, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/w11030511>
- [7] B. Eren, A. Aygün, S. Likos, y A. İ. Damar, "Yağmur Suyu Hasadı: Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüs Örneği," 4th International Symp. on Innovative Technologies in Engineering and Science 3-5November 2016 (SITES2016 Alanya/Antalya - Turkey), 2016.
- [8] V. Feijoo Moreno y A. Perea Agredo, "Aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en la Universidad del Valle sede Meléndez," Universidad del Valle sede Meléndez, Colombia, 2015.
- [9] J. L. Henao Cárdenas y Y. Castaño Arango, "Gestión ambiental universitaria a partir del aprovechamiento de agua pluvial. Caso de estudio," Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2016.
- [10] A. R. Ruiz Mendoza, "Aprovechamiento hídrico y sistema de captación de agua pluvial en techos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Peruana Los Andes-Huancayo," Universidad Peruana Los Andes-Huancayo, Perú, 2020.

- [11] B. Q. Fortunato, S. O. Antoun Netto, y L. V. Barbalho, "Levantamento topográfico do campus UERJ Maracanã para regularização patrimonial," *R. bras. Geom.*, vol. 7, no 2, p. 115, 2019. doi: 10.3895/rbgeo.v7n2.8827
- [12] G. O. Lima, M. C. O. Caldeira, y C. R. T. Caldeira, "Análise comparativa entre métodos de levantamento planialtimétrico para elaboração do plano diretor da comissão regional de obras em Belém – PA," *R. bras. Geom.*, vol. 8, no 4, p. 338, 2020. doi: 10.3895/rbgeo.v8n4.12307
- [13] A. G. Entrop y A. Vasenev, "Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 63-68, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.636>
- [14] R. R. S. de Melo, D. B. Costa, J. S. Álvares, y J. Irizarry, "Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites," *Safety Science*, vol. 98, pp. 174-185, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.008>
- [15] L. Inzerillo, G. Di Mino, y R. Roberts, "Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress," *Automation in Construction*, vol. 96, pp. 457-469, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.010>
- [16] E. Romero-Chambi, S. Villarroel-Quezada, E. Atencio, y F. Muñoz-La Rivera, "Analysis of Optimal Flight Parameters of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Detecting Potholes in Pavements," *Applied Sciences*, vol. 10, no 12, p. 4157, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/app10124157>
- [17] J. H. A. Rocha, N. G. C. Chileno, S. N. A. Rodriguez, A. I. A. Brañez, J. G. T. Camacho, y H. L. S. Miranda, "Pothole Identification in Flexible Pavement Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," en Proceedings of the 6th Brazilian Technology Symp. (BTSym'20), Y. Iano, O. Saotome, G. Kemper, A. C. Mendes de Seixas, y G. Gomes de Oliveira, Eds., en Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 233. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 589-597. doi: 10.1007/978-3-030-75680-2_65.
- [18] R. Roblero, J. Flores, y Colegio de Postgraduados, "Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana," *VCS*, no 11, pp. 111-124, 2022, doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.197>
- [19] B. Silveira, R. Melo, y D. B. Costa, "Using UAS for Roofs Structure Inspections at Post-occupational Residential Buildings," en Proceedings of the 18th International Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, E. Toledo Santos y S. Scheer, Eds., en Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 98. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1055-1068. doi: 10.1007/978-3-030-51295-8_73
- [20] A. Yasin Yiğit y O. Orhan Ali Ulvi, "Investigation of The Rainwater Harvesting Potential at the Mersin University, Turkey," *Mersin Photogrammetry Journal*, vol. 2, no 2, pp. 64-75, 2020.
- [21] (DGAC) Dirección General de Aeronáutica Civil, "Boletín reglamentario: Regulación para el uso de aeronaves no tripuladas (RPAs)," 2023. [En línea]. Available: <https://www.dgac.gob.bo/drones/>
- [22] Y. Tan y Y. Li, "UAV Photogrammetry-Based 3D Road Distress Detection," *IJGI*, vol. 8, no 9, p. 409, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>
- [23] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, y P. Martínez-Carricondo, "UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points," *Remote Sensing*, vol. 12, no 15, p. 2447, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- [24] DJI, "Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario V1.2," 2018. [En línea]. Available: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_ES.pdf
- [25] A. M. Saad y K. N. Tahar, "Identification of rut and pothole by using multicopter unmanned aerial vehicle (UAV)," *Measurement*, vol. 137, pp. 647-654, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>
- [26] R. D. Ballesteros Ruiz, A. C. Lordsleem Júnior, y J. H. Aquino Rocha, "Inspeção de fachadas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT): estudo exploratório," *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 11, no 1, pp. 88-104, 2021. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>
- [27] A. K. Fernández-Dávalos, C. L. Saavedra-Téllez, J. R. Muñoz-Pardo, J. P. Ramos-Machuca, N. G. Cayo-Chileno, y J. H. A. Rocha, "Análisis comparativo entre los programas Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper para la identificación de fallas en pavimento flexible usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)," en Congreso Internacional sobre Patología y Reabilitación das Construções, Universidade Federal do Ceará, 2021, pp. 818-827. doi: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.103>
- [28] (SENAMHI) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, "Información Nacional de Datos Hidrometeorológicos," 2023b. Available: <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>
- [29] (SENAMHI) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, "Observatorio Nacional de Servicios Climáticos," 2023a. Available: <https://senamhi.gob.bo/index.php/onsc>

- [30] A. Martínez de Azagra-Paredes, "Particularización al método de los coeficientes de escorrentía," México, 2006.
- [31] G. Monsalve Sáenz, "Hidrología en la Ingeniería," Colombia, 1999.
- [32] G. Frasier y L. Myers, "Manual de recolección de agua – Manual de agricultura. Número 600. E.E.U.U: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos," 1983.
- [33] DIN, "Rainwater Harvesting Systems—Part 1: Planning, Installation, Operation and Maintenance," 1989.
- [34] J. E. Espinoza Correa, C. A. Solano de la Sala Monteros, F. L. Espinoza Urgilés, y F. G. Gonzaga Barreto, "Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico en la Isla Jambelí, cantón Santa Rosa," *Cumbres* (En línea), vol. 3, no 1, pp. 151-159, 2017. doi: <https://doi.org/10.48190/cumbres.v3n1a19>
- [35] S. Rojas Marmolejo, "Cálculo de precipitaciones y caudales de diseño de sistema de drenaje pluvial urbano en zonas de Huancavelica," Universidad de Huancavelica, Perú, 2018.
- [36] A. Memduhoğlu, "Identifying impervious surfaces for rainwater harvesting feasibility using unmanned aerial vehicle imagery and machine learning classification," *Advanced GIS*, vol. 3, no 1, Art. no 1, 2023. doi: <https://orcid.org/0000-0002-9072-869X>
- [37] H. Aksu y M. A. Akgül, "Performance evaluation of CHIRPS satellite precipitation estimates over Turkey," *Theor Appl Climatol*, vol. 142, no 1, pp. 71-84, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.20>
- [38] C. Toté, D. Patricio, H. Boogaard, R. van der Wijngaart, E. Tarnavsky, y C. Funk, "Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique," *Remote Sensing*, vol. 7, no 2, pp. 1758-1776, 2015. doi: <https://doi.org/10.3390/rs70201758>
- [39] T. Dinku, C. Funk, P. Peterson, R. Maidment, T. Tadesse, H. Gadain, y P. Ceccato, "Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa," *Quart J Royal Meteor Soc*, vol. 144, no S1, pp. 292-312, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- [40] C. Le Noir, N. G. Cayo, A. Araoz, M. Veliz, A. Cardoso, R. Fuentes, M. Coria y J. H. A. Rocha, "Evaluación de la factibilidad del uso de datos satelitales en la extensión de las series cortas de precipitación para las estaciones terrestres en el contexto de la cuenca del Río Taquiña - Cochabamba, Bolivia," UNIVALLE. 2022. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366205297_Evaluacion_de_la_factibilidad_del_uso_de_datos_satelitales_en_la_extension_de_las_series_cortas_de_precipitacion_para_las_estaciones_terrestres_en_el_contexto_de_la_cuenca_del_Rio_Taquina_-_Cochabamba
- [41] C. Amisse, A. M. L. Machado, y J. A. S. Centeno, "Extraction of geometrical information used in photovoltaic and rainwater harvesting potential estimation from UAV optical images," *RBE*, vol. 25, no 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i3.460>
- [42] (EPA) Environmental Protection Agency, "Managing Wet Weather with Green Infrastructure: Rainwater Harvesting Policies," 2008.
- [43] (NSW) Department of Environment and Conservation, "Managing Urban Stormwater: Harvesting and Reuse," Australia, 2006.
- [44] (NHS) National Services Scotland, "Research Report Rainwater Harvesting. Inglaterra," Inglaterra, 2013.