

Cálculo de la captación de agua de lluvia en azoteas a través de fotogrametría con drones

Calculating Rainwater Harvesting on Roofs Using Drone Photogrammetry

Alejandro Servin Maravillas¹ , Danny Arroyo Espinoza¹ , Silvia Beatriz González Brambila¹ 

¹Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco, México.

Cómo citar

A. Servin Maravillas, D. Arroyo Espinoza, and S. B. González Brambila, "Cálculo de la captación de agua de lluvia en azoteas a través de fotogrametría con drones," Ingeniería: ciencia, tecnología e innovación, vol. 13, 2026.
<https://doi.org/10.26495/b7fbm638>

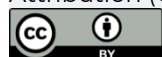
Información del artículo

Recibido: 06/05/2025
Aceptado: 30/03/2026
Publicado: 02/07/2026

Autor correspondencia

Alejandro Servin Maravillas,
al2152000552@azc.uam.mx

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons Attribution (CC BY)



RESUMEN: Este estudio abordó la creciente escasez de agua en zonas urbanas, proponiendo la captación de agua de lluvia en azoteas como alternativa sostenible. El **objetivo** general de este trabajo fue desarrollar e implementar un sistema para la estimación del potencial de recolección de agua de lluvia en azoteas, utilizando un dron y datos meteorológicos. Se generaron ortomosaicos para calcular el área de cada azotea y se determinó un coeficiente de escurrimiento ponderado según los materiales predominantes. Con un modelo matemático, se estimó que el volumen de captación oscila entre 90 m³ y 285 m³ por año, dependiendo del tamaño y composición de la superficie. Los **resultados** indicaron que las azoteas con mayor proporción de concreto impermeabilizado presentaron el mayor potencial de recolección. Se **concluye** que la combinación de drones, SIG de código abierto y datos climáticos gratuitos ofrece una metodología precisa, eficiente y replicable en contextos urbanos con recursos limitados, y que su adopción podría reducir hasta un 20 % el consumo residencial promedio.

Palabras clave: elementos estructurales, escorrentía, fotografía aérea, sistemas de información geográfica SIG, teledetección.

ABSTRACT: This study addressed the growing scarcity of water in urban areas and proposed rooftop rainwater harvesting as a sustainable alternative. The **main** objective was to develop and implement a system for estimating the rainwater harvesting potential of rooftops using a drone and meteorological data. Orthomosaics were generated to calculate the area of each roof, and a weighted runoff coefficient was determined based on the predominant materials. Using a mathematical model, we estimated that the annual catchment volume ranges from 90 m³ to 285 m³, depending on the size and composition of the surface. The **results** showed that rooftops with a higher proportion of waterproofed concrete exhibited the greatest collection potential. **Overall**, the combination of drones, open source GIS, and freely available climate data provides an accurate, efficient, and replicable methodology for urban contexts with limited resources, and its adoption could reduce average residential water consumption by up to 20%.

Keywords: structural elements, runoff, aerial photography, geographic information systems GIS, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental de la Tierra, esencial para el desarrollo y la preservación de la humanidad [1]. Por ello, es responsabilidad de todos comprender su importancia, valorarla y gestionarla eficazmente. En términos cuantitativos, el agua abarca el 71% de la superficie terrestre, lo que equivale a aproximadamente 1,386 millones de km³ (97,5% agua salada y 2,5% agua dulce) [2]. La salada se concentra en los océanos, mientras que la dulce (alrededor de 34,650 km³) se reparte de la siguiente manera: 68,7% en hielos y glaciares, 30,1% en acuíferos y 1,2% en ríos y lagos [2].

Durante las últimas cuatro décadas, se ha observado una tendencia global de crecimiento demográfico y desarrollo socioeconómico, lo que ha generado cambios en los patrones de consumo y un aumento en el uso del agua de aproximadamente 1% anual [3].

Los acuíferos representan la segunda mayor reserva de agua dulce en el mundo y constituyen la mitad del volumen extraído para usos domésticos a nivel global [3]. Esta extracción excesiva ha contribuido a la escasez del recurso, ya que se estima que el ritmo de agotamiento de los acuíferos varía entre 100 y 200 km³ por año, lo que representa entre el 15% y el 25% de todas las extracciones de aguas subterráneas [3].

En México, según las Estadísticas del Agua en México 2023 [4], existen 253 acuíferos, de los cuales 111 están sobreexplotados, es decir, se extrae más agua de la que se recarga de manera natural.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que una persona requiere en promedio 100 litros de agua al día para satisfacer sus necesidades básicas de consumo e higiene [5]. Sin embargo, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) estima que el consumo promedio por habitante es de 380 litros diarios [6], lo que representa un exceso del 200% respecto a la recomendación de la OMS.

Frente a este escenario de creciente presión sobre los recursos hídricos y la sobreexplotación de acuíferos, la justificación de este trabajo radica en ofrecer una alternativa orientada a promover prácticas locales y sostenibles de gestión del agua en entornos urbanos.

Estimar la cantidad de agua de lluvia que puede ser captada en azoteas, contribuye a impulsar iniciativas para la implementación de mecanismos de recolección, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas y proporcionarles un conocimiento sobre el potencial de captación de agua de lluvia en sus hogares, permitiéndoles decidir si es viable implementar sistemas de recolección.

Por tanto, el objetivo general de este trabajo fue desarrollar e implementar un sistema para la estimación del potencial de recolección de agua de lluvia en azoteas, utilizando un dron y datos meteorológicos.

Para alcanzarlo, se establecieron como objetivos específicos: 1) recolectar datos obtenidos del dron para medir la superficie de las azoteas, empleando fotogrametría; 2) obtener datos meteorológicos y de precipitaciones del medio Meteostat [7], para elaborar un modelo matemático; 3) diseñar un modelo matemático que integre los datos recolectados para calcular el potencial de recolección de agua de lluvia; 4) implementar el modelo para examinar los resultados y mejorar su rendimiento.

1.1 Antecedentes

La captación de agua de lluvia a escala local se ha desarrollado como una alternativa práctica para mitigar problemas de abastecimiento y reducir la presión sobre fuentes convencionales de agua en contextos urbanos.

Distintos estudios han explorado tanto el diseño de sistemas domésticos como la evaluación de su viabilidad y calidad del recurso. En la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Azcapotzalco de la Ciudad de México, por ejemplo, se diseñó un sistema de captación y tratamiento para un edificio universitario que reportó un potencial de captación de 745,73 L y evidenció la necesidad de un tratamiento previo para uso seguro, proponiendo una solución de bajo costo y fácil instalación para la comunidad [8]. En contextos rurales y agrícolas, se han desarrollado sistemas computacionales y de simulación para estimar la disponibilidad de agua de lluvia y su impacto en la agricultura, que integran módulos de consulta de datos, simulación y evaluación de viabilidad para períodos específicos [9].

Paralelamente, se han documentado experiencias de implementación y tratamiento que permiten convertir la captación de lluvia en agua apta para distintos usos. En Huixquilucan, Estado de México, se implementó un sistema de captación doméstico y un proceso de filtración / desinfección que, tras un tratamiento por cloración, logró cumplir con los criterios de potabilidad establecidos, pese a hallazgos iniciales de contaminación microbiológica [10]. En conjunto, las investigaciones señalan que los cálculos de volumen deben complementarse con análisis de calidad del agua y con la definición de tratamientos apropiados al contexto, para garantizar que el recurso sea seguro y utilizable [11].

En cuanto a la metodología para estimar volúmenes y seleccionar sitios adecuados, la combinación de técnicas geoespaciales y modelado ha mostrado resultados firmes. Trabajos dirigidos a la agricultura urbana han desarrollado metodologías que calculan coeficientes de escurrimiento ponderado, precipitación media mensual y volumen de captación para usos específicos como el cultivo de lechuga, además de proponer estrategias para optimizar la captura según las temporadas húmedas y secas [12]. Estudios que emplean vehículos aéreos no tripulados (VANT) y ortomosaicos han demostrado ser eficaces para determinar áreas de azoteas y, junto con modelos matemáticos y técnicas de ponderación espacial [13] implementadas en SIG (Sistemas de Información Geográfica) [14], permiten estimar la capacidad de recolección y mejorar la ubicación de tanques de almacenamiento. Un caso aplicado es en el campus universitario de Gurgaon, India, el cual reportó volúmenes cercanos a 11,23 millones de litros de agua al año [15]. Análogamente, análisis basados con ArcGIS [16] y SIG [14] en el suburbio de Wollert, Victoria, Australia, calcularon el potencial de captación disponible para diferentes superficies; techos, vías y espacios abiertos, estimando un alto potencial anual de cosecha para la localidad de aproximadamente 120 millones de litros de agua [17].

2. MATERIALES Y METODOS

En esta sección se presentan las herramientas, conceptos y fórmulas que fueron fundamentales para la ejecución del proyecto. A modo de guía, cada subsección de este capítulo corresponde a un módulo específico de la Figura 1 que resume de manera integral la estructura y el flujo del proyecto.

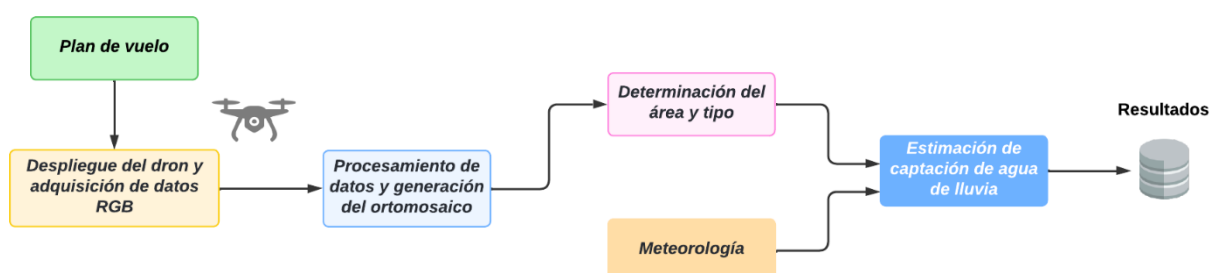


Figura 1. Diagrama de bloques del proyecto con las etapas/módulos de trabajo.

Fuente: elaboración propia.

2.1 Marco Teórico

Plan de Vuelo

DJI (Da Jiang Innovations), fundada en 2006 por Frank Wang en Shenzhen, China, se ha consolidado como el fabricante dominante de drones civiles, con más del 70 % de la cuota de mercado global gracias a su continua inversión en sistemas de visión aérea de alta precisión. Su catálogo abarca desde modelos ligeros para aficionados hasta plataformas industriales para inspección, cartografía y seguridad pública [18].

La compañía ha implementado funciones específicas para garantizar la seguridad de los datos capturados por sus dispositivos. Por ejemplo, el modo de datos locales permite aislar el dron de redes externas, evitando que la información de vuelo se transmita a través de Internet. Asimismo, el uso de cifrado AES 256 protege la transmisión de control y telemetría entre el dron y el control remoto. Además, el sistema AirSense (ADS B) permite detectar aeronaves tripuladas cercanas y notificar al operador en tiempo real, lo que incrementa la seguridad del vuelo [18].

El Phantom 4, lanzado en 2016, marcó un avance importante dentro de esta serie, orientado a profesionales de la fotografía aérea, cartografía de precisión y monitoreo de infraestructura. Sus prestaciones lo han convertido en una herramienta ampliamente usada en proyectos académicos, ambientales y de ingeniería.

Sus características más importantes se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas y de hardware del dron Phantom 4. Fuente: [19].

Característica	Especificación
Marca y modelo	DJI Phantom 4 Pro
Sensor / cámara integrada	Sensor CMOS de 1 pulgada, 20 MP; apertura ajustable (f/2.8 - f/11)
Resolución (imágenes / video)	Fotografías: 20 MP; Video: 4K (3840×2160) a 60 fps
Gimbal	Estabilizador mecánico de 3 ejes
Tiempo de vuelo / autonomía	Hasta 30 minutos (en condiciones ideales)
Alcance del control remoto	Hasta 7 km (según normativas FCC)
Sistema y transmisión	OcuSync, que ofrece transmisión en HD con baja latencia
GPS y navegación	Sistema dual (GPS + GLONASS) para mayor precisión en la ubicación y retorno automático
Altitud de vuelo max. por encima del nivel del mar	6000 m
Velocidad máxima	Aproximadamente 72 km/h (según condiciones y configuraciones)
Sensores de obstáculos	Detección de obstáculos en dirección frontal y trasera, lo que mejora la seguridad durante la operación
Capacidad de la batería	Aproximadamente 6000 mAh LiPo (valor aproximado, que contribuye a alcanzar la autonomía mencionada)
Modos inteligentes de vuelo	Diversos modos que optimizan la captura de imágenes (por ejemplo, seguimiento de objetivos, vuelo estacionario y retorno automático)
Almacenamiento externo	microSD, Capacidad máxima: 128GB. Velocidad de escritura ≥ 15 MB/s; se necesita clasificación clase 10 o UHS-I-

Un elemento que va ligado al pilotaje de drones, son los simuladores de vuelo para consolas de videojuegos o equipos de cómputo. Estos juegos de video ofrecen una experiencia interactiva y accesible para usuarios que desean mejorar sus habilidades en el manejo de drones. Recrean entornos virtuales con obstáculos y desafíos que requieren precisión y coordinación, facilitando la familiarización con los controles y la respuesta ante diversas situaciones de vuelo [20].

Una recomendación para preparar el plan de vuelo para un dron es utilizar alguna plataforma de visualización geoespacial para determinar la posición de despegue, aterrizaje y observar el entorno con sus obstáculos. Google Earth es una buena opción [21].

Desarrollada por Google, permite explorar el planeta mediante imágenes satelitales, modelos tridimensionales y datos cartográficos. Desde su lanzamiento en 2001, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta esencial para diversos campos como la educación, la planificación urbana, la ingeniería y la investigación ambiental.

En el contexto de este proyecto, ofrece múltiples beneficios como la identificación de superficies, análisis topográfico y monitoreo temporal de las áreas.

Despliegue del dron y adquisición de datos RGB

DJI GO 4 es una aplicación desarrollada por DJI que permite a los usuarios controlar y gestionar drones de las series Phantom 4, Mavic, Spark e Inspire 2. Esta herramienta proporciona una interfaz intuitiva para monitorear el estado del dron, ajustar configuraciones de vuelo y cámara, y acceder a funciones avanzadas durante las operaciones aéreas [22].

PIX4Dcapture Pro es una aplicación móvil desarrollada por Pix4D que permite planificar y controlar vuelos de drones de manera autónoma, optimizando la adquisición de datos para la generación de mapas y modelos 2D y 3D. Esta herramienta es compatible con una amplia gama de drones de las marcas DJI y Parrot, incluyendo modelos como el Phantom 4, utilizado en este proyecto [23].

Drone Harmony es una plataforma suiza de planificación y gestión de vuelos de drones, especializada en la ejecución autónoma de misiones de inspección y mapeo. Diseñada para profesionales, permite crear planes de vuelo complejos con solo unos toques, establecer rutas de vuelo automatizadas y ajustar parámetros de vuelo en tiempo real [24].

Un mecanismo importante que DJI desarrolló para la seguridad de los vuelos es el Fly Safe; un sistema integral para promover la seguridad en los vuelos de drones mediante la implementación de geovallado. Este sistema utiliza tecnología GPS para crear zonas virtuales de no vuelo alrededor de áreas sensibles como aeropuertos, instalaciones gubernamentales y zonas de emergencia, garantizando que los operadores de drones operen dentro de los límites legales y seguros establecidos por las autoridades aeronáuticas [25].

En la operación de drones, los dispositivos móviles (tabletas y celulares) cumplen el rol de estación de control y visualización. A través de las aplicaciones descritas previamente, estos equipos reciben la señal de video en tiempo real, permiten ajustar parámetros de vuelo y cámara, y envían comandos de control al dron. La elección entre celular o tableta depende principalmente del tamaño de pantalla deseado [26].

Las fotografías capturadas por un Phantom 4 deben almacenarse en una tarjeta microSD de categoría UHS I U3 o superior, con velocidad de escritura sostenida de al menos 30 MB/s y capacidad de hasta 128 GB para asegurar la integridad de los archivos RAW y 4K. Estas especificaciones garantizan que la tasa de datos generada por el sensor de 20 MP y la grabación de video en 4K a 60 fps se almacene sin pérdidas ni interrupciones [26].

Procesamiento de datos y generación del ortomosaico

OpenDroneMap (ODM) es un conjunto de herramientas de código abierto destinado al procesamiento de imágenes capturadas por drones para generar productos geoespaciales como ortomosaicos [27], nubes de puntos 3D y modelos de elevación digital. Desarrollado por la OpenDroneMap community desde 2014, ODM ofrece una alternativa gratuita y extensible a soluciones comerciales como Pix4D o Agisoft Metashape [28].

Entre sus características principales están la ortorectificación, reconstrucción 3D, modelos de elevación y la posibilidad de ejecutarse en entornos como Windows, MacOS o Linux, ya sea por línea de comandos o haciendo uso de la versión de escritorio WebOpenDroneMap (WebODM) [28].

QGIS (Quantum GIS) es un software libre y de código abierto para el análisis y visualización de datos geoespaciales. Iniciado en 2002 por Gary Sherman, QGIS es mantenido por una comunidad global de desarrolladores bajo la OSGeo (Open Source Geospatial Foundation) y se distribuye gratuitamente bajo licencia GNU GPL [29].

Entre sus características principales están la visualización de capas, análisis espacial, uso de complementos (plugins), edición y creación de estructuras de datos (bases de datos, tabla de atributos) y diseño de mapas [29].

Determinación del área y tipo

Un shapefile es un formato de datos geoespaciales vectoriales desarrollado por ESRI en la década de 1990 para representar entidades geográficas (puntos, líneas y polígonos) junto con sus atributos en tablas asociadas [30]. A pesar de su nombre, un "shapefile" consta en realidad de al menos tres archivos obligatorios; .shp, .shx y .dbf. Estos trabajan en conjunto con otros tres que son complementarios; .prj, .qix y .cpg. En la Tabla 2 se presenta el contenido de cada uno de ellos.

Tabla 2. Estructura, elementos y características de un archivo shapefile. Fuente: [30].

Extensión	Contenido
.shp	Geometría de las entidades (coordenadas de puntos, líneas, polígonos)
.shx	Índice espacial que vincula las geometrías con la tabla de atributos
.dbf	Tabla de atributos en formato dBASE, donde cada registro describe propiedades de una entidad
.prj	Define el sistema de coordenadas y proyección espacial (WKT).
.qix	Índices espaciales mejorados para acelerar consultas.
.cpg	Indica la codificación de caracteres de la tabla .dbf (UTF-8, ANSI).

Streamlit es un framework de Python de código abierto lanzado en 2019 que facilita la creación de aplicaciones web interactivas para análisis de datos y machine learning sin necesidad de conocimientos avanzados de desarrollo web [31].

Una aplicación Streamlit típica consta de un único script Python. Al ejecutarlo, Streamlit crea un servidor local que renderiza la interfaz definida por el código. La disposición de elementos sigue el flujo imperativo del script, facilitando el diseño sin patrones complejos de callback [31].

En este sentido, Streamlit es una buena opción para desarrollar un panel interactivo en donde se pueda mostrar todos los elementos que componen a este proyecto.

Bibliotecas como streamlit-option-menu y streamlit-folium mejoran la navegación y permiten visualizar mapas interactivos directamente en la aplicación. Folium, GeoPandas y GeoPy se encargan de gestionar datos geoespaciales, representar azoteas y rutas de vuelo, así como de geocodificar ubicaciones. Rasterio permite leer y analizar ortomosaicos en formato raster, mientras que Pandas, NumPy, Matplotlib y Seaborn procesan datos, generan análisis estadísticos y producen visualizaciones gráficas. Estas descripciones se encuentran resumidas en la Tabla 3.

El coeficiente de escurrimiento individual C_{ei} es un parámetro adimensional que relaciona la lluvia incidente con la porción que se convierte en escorrentía superficial. Varía según la rugosidad y permeabilidad del material [12].

Los valores del C_{ei} varía de 0 y 1 indicando que toda la precipitación es retenida en el área de captación y que toda es escorrentía, respectivamente [12].

Los valores del coeficiente de escurrimiento son producto de diversos factores como: tipo (lluvia, nieve o granizo), cantidad, intensidad y distribución de precipitación en el tiempo; humedad inicial de la superficie; tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, material, grado de compactación, pendiente, relieve, rugosidad); intercepción producida por la cubierta vegetal; lapso (minutos, horas, días, meses, año). En este caso la cantidad

de lluvia y tipo de terreno (material del techo) son importantes con el objetivo de captar agua de lluvia en las azoteas [12].

Tabla 3. Paquetería de Python implementada en el desarrollo del programa. Fuente: [7], [31] - [39].

Biblioteca	Versión	Descripción
streamlit [31]	1.43.1	Framework para crear aplicaciones web interactivas de forma rápida y sencilla.
streamlit – folium [31]	0.24.0	Permite integrar mapas interactivos de Folium dentro de una aplicación Streamlit.
streamlit-option-menu [31]	0.4.0	Facilita la creación de menús de navegación horizontales o verticales en Streamlit.
folium [32]	0.19.5	Biblioteca para generar mapas interactivos basada en Leaflet.
geopandas [33]	1.0.1	Extiende pandas para el manejo y análisis de datos geoespaciales.
rasterio [34]	1.4.3	Herramienta para leer y procesar datos raster geoespaciales (ortofotos, etc.).
matplotlib [35]	3.9.4	Biblioteca de gráficos para crear visualizaciones estáticas.
seaborn [36]	0.13.2	Complemento de matplotlib para crear gráficos estadísticos con un estilo atractivo y moderno.
numpy [37]	2.0.2	Paquete fundamental para computación numérica y manejo de arrays.
pandas [38]	2.2.3	Biblioteca para manipulación y análisis de datos utilizando estructuras DataFrame.
meteostat [7]	1.6.8	Provee acceso a datos meteorológicos históricos para análisis climáticos.
geopy [39]	2.4.1	Biblioteca para geocodificación y geolocalización, que convierte direcciones en coordenadas y viceversa.

En la Tabla 4 se encuentran los coeficientes de escurrimiento individuales C_{ei} de materiales comunes y usados en este proyecto.

A partir de lo anterior, existen superficies (azoteas) que llegan a ser heterogéneas en cuanto a los materiales que la componen y es ahí cuando se opta por calcular un coeficiente de escurrimiento ponderado (C_e), con el fin de que refleje de forma integral la capacidad de la superficie para conducir el agua [12].

Observando (1) [12], esta refleja los elementos para calcular dicho valor. Con esto se permite integrar las variaciones de escurrimiento de cada material, ponderándolas según su proporción en el área total, lo que resulta en un valor global representativo de la capacidad de la azotea para drenar el agua de lluvia.

$$C_e = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ei} * a_i)}{A} \quad (1)$$

C_e = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional y con valores de 0 a 1.

C_{ei} = Coeficiente de escurrimiento del área individual i , adimensional y con valores entre 0 y 1.

a_i = Área correspondiente a la zona i (en m^2).

A = Área total de la superficie de captación (en m^2).

n = Número total de subáreas consideradas, cada una correspondiente a un material diferente.

Tabla 4. Materiales identificados en las azoteas de estudio con sus coeficientes de escurrimiento. Fuente: [12], [40] - [42].

Material	Coeficiente de escurrimiento C_{ei}	Fuente
Concreto impermeabilizado	0,80	[12]
Plástico	0,93	[40]
Policarbonato	0,95	[41]
Poliuretano	0,95	[12]
Loseta	0,85	[42]

Meteorología

Meteostat es una biblioteca y plataforma de datos climáticos de libre acceso que proporciona series temporales históricas, actuales y climatológicas, útiles para aplicaciones científicas, educativas y tecnológicas. Su objetivo principal es facilitar el acceso a datos meteorológicos estandarizados provenientes de estaciones meteorológicas alrededor del mundo [7].

Permite la consulta remota de datos desde aplicaciones o scripts en Python, convirtiéndola en una herramienta ideal para integrar información climática en plataformas de análisis geoespacial, modelado ambiental o estudios urbanos [43].

Entre sus características están el acceso a datos históricos, cobertura mundial, API gratuita, soporte para coordenadas geográficas y actualización frecuente.

Esta aplicación fue usada para conseguir el promedio de precipitación mensual de las diferentes azoteas de estudio, como se muestra en (2) [12]. A partir de este valor fue posible calcular el promedio anual con (3) [12].

Estos resultados son fundamentales para lograr calcular el potencial de captación más adelante.

$$\bar{P}(m) = \frac{1}{n} \sum_{y=Y_1}^{Y_2} P(m, y) \quad (2)$$

$\bar{P}(m)$ = Promedio de precipitación mensual del mes m .

$P(m, y)$ = Precipitación (en mm) registrada en el mes m y el año y .

Y_1, Y_2 = Año de inicio (Y_1) y fin (Y_2) del rango, respectivamente.

n = El número de años en el rango ($Y_2 - Y_1$) + 1.

$$\bar{P}(a) = \sum_{m=1}^{12} \bar{P}(m) \quad (3)$$

$\bar{P}(a)$ = Promedio de precipitación anual a .

$\bar{P}(m)$ = Promedio de precipitación mensual del mes m .

m = Mes m .

Estimación de captación de agua de lluvia

Finalmente, en este último módulo se aplicó el modelo matemático (4) [12] para calcular el potencial de captación de agua de lluvia, expresado en volumen (metros cúbicos).

$$V = C_e * A * \bar{P}(a) \quad (4)$$

V = Volumen o potencial de captación, m³.

C_e = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional.

A = Área total de la superficie de captación, m².

$\bar{P}(a)$ = Precipitación media anual a .

2.2 Desarrollo del proyecto

En esta sección se presenta el proceso de implementación del proyecto de manera modular, haciendo uso de la Figura 1 como guía. Se explican las técnicas y herramientas empleadas.

En esta sección se presenta el proceso de implementación del proyecto de manera modular, haciendo uso de la Figura 1 como guía. Se explican las técnicas y herramientas empleadas.

Plan de vuelo

En este primer módulo, la prioridad fue familiarizarse con el dron a utilizar (Phantom 4), apoyándose del manual oficial de DJI [19], así como con la mayoría de sus características, incluyendo sus sensores, modos de vuelo, componentes, cuidados y las restricciones o procedimientos necesarios para realizar vuelos en zonas específicas.

Con el fin de desarrollar la destreza manual necesaria para pilotear el dron, se adquirió un simulador de vuelo desarrollado por Megame para la consola Nintendo Switch [44]. Esta herramienta permitió practicar y perfeccionar las habilidades de vuelo en un entorno controlado antes de operar el dron en situaciones reales.

Finalmente, se utilizó el software Google Earth [21] para localizar y registrar las direcciones de las azoteas seleccionadas para este estudio, todas localizadas en diferentes alcaldías de la Ciudad de México. Además, se empleó su herramienta de medición de superficies (área en m²) para obtener una primera aproximación o estimación del área total de cada azotea, resumiéndose en la Tabla 5.

Tabla 5. Ubicación y dimensiones preliminares de las azoteas de estudio. Fuente: elaboración propia.

Área de estudio	Dirección (Alcaldía)	Superficie preliminar (m ²)
Azotea 1	Gustavo A. Madero	134,41
Azotea 2	Gustavo A. Madero	115,02
Azotea 3	Miguel Hidalgo	412,24
Azotea 4	Álvaro Obregón	166,11
Azotea 5	Benito Juárez	373,02

Despliegue del dron y adquisición de datos RGB

En el segundo módulo se utilizaron aplicaciones que permitieron realizar vuelos programados con el Phantom 4. Estas herramientas facilitaron el trazado del área, la trayectoria (malla) y la altura del vuelo, ajustándolos según las necesidades del proyecto.

Los softwares empleados (con licencia de uso gratuito) fueron Drone Harmony [24], Pix4DCapture [23] y DJI GO 4.0 [22]. Esta última es la aplicación predeterminada del dron y fue esencial para establecer la conexión entre el software de planificación de vuelos y la aeronave.

Los vuelos se llevaron a cabo durante las vacaciones decembrinas de 2024 en México. Esta fecha fue seleccionada debido a la baja actividad en los edificios y viviendas donde se realizaron los vuelos, así como por las condiciones climáticas favorables, que garantizaron la estabilidad del dron y la calidad de las fotografías tomadas. Los detalles sobre las características de cada vuelo, así como los lugares específicos en que se llevaron a cabo, se encuentran en la Tabla 6.

Adicionalmente, para realizar vuelos en las áreas donde se ubican las azoteas, fue necesario tramitar un permiso de desbloqueo de zona a través de la aplicación DJI Fly Safe [25]. A estas zonas, la empresa DJI les llama Zonas Geo y funcionan como fronteras virtuales que los drones no pueden sobrepasar o tienen algún tipo de restricción como el límite de altura de vuelo.

Tabla 6. Características de las azoteas de estudio y parámetros de los vuelos realizados.
Fuente: elaboración propia.

Dirección	Tipo de construcción	Altura de vuelo (m)	Tipo de vuelo(Manual/Programado)	Tipo de malla de vuelo
Azotea 1	Casa habitación	– 25	Manual, usando aplicación DJIGO 4.0.	Simple (2D)
Azotea 2	Casa habitación	– 25	Manual, usando aplicación DJIGO 4.0.	Simple (2D)
Azotea 3	Complejo habitacional	20	Programado, usando aplicación Drone Harmony.	Simple (2D)
Azotea 4	Complejo habitacional	30	Manual, usando aplicación DJIGO 4.0.	Simple (2D)
Azotea 5	Complejo habitacional	20	Programado, usando aplicación Drone Harmony.	Simple (2D)

En cuanto a la visualización en tierra, se utilizó una tableta Lenovo Tab M9 con sistema operativo Android 13 y un smartphone Motorola G50 5G con Android 11.

El almacenamiento de las fotografías capturadas se gestionó mediante una tarjeta de memoria MicroSD de categoría 10, con capacidad de 64 GB.

Finalmente, se construyó una base de despegue y aterrizaje para el Phantom 4 (Figura 2). El objetivo de esta fue facilitar la identificación del punto de retorno del dron. Esta base también proporcionó estabilidad durante las operaciones de despegue y aterrizaje, como puede apreciarse en la Figura 3.



Figura 2. Base de despegue y aterrizaje utilizada para los vuelos del dron Phantom 4.
Fuente: elaboración propia.

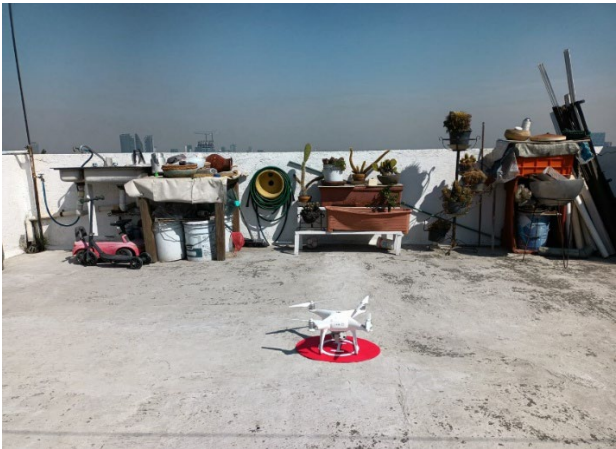


Figura 3. Dron Phantom 4 colocado en la base de aterrizaje, preparado para iniciar el vuelo.
Fuente: elaboración propia.

Procesamiento de datos y generación del ortomosaico

En este módulo, una vez realizados los vuelos y capturadas las imágenes aéreas de las azoteas, se procedió a procesarlas utilizando el software de código abierto de fotogrametría OpenDroneMap (ODM) [28]. En particular, se empleó la versión de escritorio [45] para el sistema operativo Windows, la cual ofrece una interfaz de usuario amigable y de fácil manejo.

Mediante esta herramienta, se generaron los ortomosaicos correspondientes a toda el área de vuelo reconstruida. Entre estos, los más relevantes fueron aquellos que permitieron visualizar de manera clara y definida la azotea de estudio.

Para mejorar la resolución de las imágenes y eliminar áreas no deseadas, se utilizó el software de código abierto QGIS v3.34.13 [29], un sistema de información geográfica. Con esta herramienta, se procesó el ortomosaico y se recortaron las superficies completas de las azoteas de estudio. Además, se realizó una edición más detallada para identificar y capturar las áreas de captación de agua de lluvia.

Determinación del área y tipo

Para este módulo, se desarrolló un programa en Python tomando como referencia el diagrama de procesos mostrado en la Figura 4. Sus elementos se describen a continuación:

- **Interfaz:** Configurada con Streamlit [31], CSS [46] y un menú de navegación horizontal.
- **Principal:** Integra y despliega cada módulo según la pestaña seleccionada, añadiendo logos, estilos y la portada del sistema llamado “ACUAPOTENCIAL”.
- **Carga de datos:** Permite subir la ortofoto y los shapefiles (área y materiales), procesando y almacenando áreas y coeficientes de escurrimiento.
- **Climatología:** Utiliza un mapa interactivo con Folium [31] para definir la ubicación, geocodifica direcciones, solicita un rango de años y obtiene la precipitación mensual promedio mediante la API de Meteostat [43], visualizándola con Matplotlib [35] / Seaborn [36].
- **Modelo de captación:** Combina áreas y datos climáticos en un modelo matemático para calcular el coeficiente de escurrimiento ponderado y estimar el volumen de captación de lluvia, mostrando los resultados en tablas y gráficos.
- **Reporte:** Genera un resumen final que incluye área, precipitación, coeficiente, volumen captado y detalle por material.

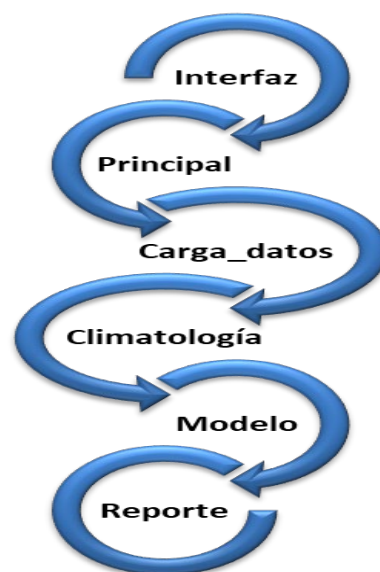


Figura 4. Diagrama de procesos secuencial utilizado para la implementación del programa en Python. Fuente: elaboración propia.

Además de las bibliotecas mencionadas anteriormente, también se emplearon geopandas[33], rasterio [34], numpy [37], geopy[39] y pandas [38].

El desarrollo se llevó a cabo en el entorno JupyterLab v4.3.6 [47], utilizando la biblioteca de código abierto Streamlit v1.43.1 [31] para la visualización de datos.

El programa requiere como entrada un shapefile, un formato vectorial de uso común en QGIS y el cual fue descrito en el marco teórico.

Para este caso, delimitamos el área a medir en metros cuadrados utilizando los archivos generados en el módulo anterior mediante QGIS v3.34.13 [29], obteniendo así el primer dato esencial: el área total de la azotea (zona de captación).

Dado que en una misma azotea pueden coexistir diferentes materiales, cada uno con su propio comportamiento hidrológico, se optó por calcular un coeficiente de escurrimiento ponderado que refleje de forma integral la capacidad de la superficie para conducir el agua. Para ello, se utilizó (1) [12], así como los coeficientes de escurrimiento individuales C_{ei} de cada material que se observan en la Tabla 4.

Usando (1) logramos integrar las variaciones de escurrimiento de cada material, ponderándolas según su proporción en el área total, lo que resulta en un valor global representativo de la capacidad de la azotea para drenar el agua de lluvia.

Para realizar este cálculo, se desarrolló una herramienta adicional similar al cálculo del área total, pero destinada a identificar las subáreas de cada material dentro de la azotea. El programa utiliza como dato de entrada el shapefile antes descrito. En su tabla de atributos se registra información sobre cada material (ID, azotea, nombre, coeficiente de escurrimiento y superficie en m^2), lo que facilita el acceso y la manipulación de estos datos para obtener el coeficiente de escurrimiento ponderado de cada azotea.

Meteorología

Para este punto se utilizó la API Meteostat v1.6.8 [43], que es de acceso gratuito para obtener datos meteorológicos históricos de las estaciones climatológicas más cercanas a los domicilios donde se encuentran las azoteas de estudio.

Se implementó un mapa que localiza las diferentes azoteas, permitiendo conocer la dirección y así determinar la estación climatológica más cercana a ese lugar, las cuales aparecen en la Tabla 7.

Tabla 7. Estaciones climatológicas de la red Meteostat más cercanas a cada azotea de estudio. Fuente: [48].

Área de estudio	Alcaldía	Estación Climatológica (Meteostat)
Azotea 1	Gustavo A. Madero	76679 – Mexico City Airport
Azotea 2	Gustavo A. Madero	76679 – Mexico City Airport
Azotea 3	Miguel Hidalgo	76680 – Mexico Central, D.F
Azotea 4	Álvaro Obregón	76680 – Mexico Central, D.F
Azotea 5	Benito Juárez	76681 – Geografía UNAM D.F / Ciudad Universitaria.

El rango de años para consultar el historial de precipitación anual en la zona es determinado por el usuario, permitiendo recuperar un robusto conjunto de datos históricos que reflejan la variabilidad de las precipitaciones en el área de estudio.

Para cada año del rango seleccionado se obtuvieron los datos mensuales de precipitación y se calculó el promedio de precipitación mensual para cada mes a lo largo del periodo consultado, utilizando (2).

Con estos cálculos, se generó una estadística descriptiva y se representó la información a través de una gráfica de barras, lo que facilita su visualización.

A partir de estos promedios mensuales, se calculó el promedio anual de precipitación sumando los valores de todos los meses, siguiendo (3).

Estimación de captación de agua de lluvia

Finalmente, en este último módulo se aplicó el modelo matemático (4) para calcular el potencial de captación de agua de lluvia, expresado en volumen (metros cúbicos).

Para su desarrollo, se utilizaron las mismas bibliotecas empleadas en el módulo de determinación y tipo, así como los datos obtenidos en los módulos anteriores. Entre estos, destacan.

- Área total de la azotea, expresada en metros cuadrados.
- Coeficiente de escurrimiento ponderado.
- Promedio de precipitación anual en la zona, convertido a metros para calcular el volumen en metros cúbicos.

3. RESULTADOS

3.1 Ortomosaicos de las azoteas

En las Figuras 5 a 9 se aprecian las ortofotos generadas de las cinco azoteas de estudio.



Figura 5. Ortofoto producida por OpenDroneMap de la azotea de estudio 1.
Fuente: elaboración propia.



Figura 6. Ortofoto producida por OpenDroneMap de la azotea de estudio 2.
Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Ortofoto producida por OpenDroneMap de la azotea de estudio 3.
Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Ortofoto producida por OpenDroneMap de la azotea de estudio 4.
Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Ortofoto producida por OpenDroneMap de la azotea de estudio 5.
Fuente: elaboración propia.

3.2

Superficie de las azoteas (Área total)

Siguiendo el orden establecido en la metodología del proyecto, el primer paso consistió en calcular la superficie total de la azotea utilizando el programa desarrollado en Python.

En la Tabla 8 se presentan tres medidas comparativas: la obtenida mediante la herramienta de medición de Google Earth, la registrada en las escrituras oficiales de los inmuebles y la calculada por el programa.

Tabla 8. Comparación de la superficie de las azoteas de estudio mediante tres métodos distintos.
Fuente: elaboración propia.

Azotea	Google Earth (m ²)	Escrituras del inmueble (m ²)	Programa en Python (m ²)
1	134,41	127	126,95
2	115,02	132	131,77
3	412,24	374,50	374,31
4	166,11	118,50	118,11
5	373,02	292	291,54

3.3 Coeficientes de escurrimiento ponderados de las azoteas

Utilizando (1), se calculó el coeficiente de escurrimiento ponderado para cada azotea, como se observa en la Tabla 9. Este valor se obtuvo considerando los distintos materiales presentes en cada superficie, los cuales se determinaron de manera manual estando en el sitio del vuelo. Además, también se consideró el coeficiente de escurrimiento correspondiente a cada uno, así como la proporción de superficie (subárea) que ocupa cada material en relación con el área total de la azotea.

Tabla 9. Materiales, subáreas y coeficientes de escurrimiento (simples y ponderados) de las azoteas de estudio. Fuente: elaboración propia.

Azotea	Material	Subárea (a_i) (m ²)	Coeficiente de escurrimiento (C_{ei})	Coeficiente de escurrimiento ponderado (C_e)
1	Concreto impermeabilizado	73,59	0,80	0,87
	Policarbonato	1,09	0,95	
	Poliuretano	52,30	0,95	
	Superficie (área total)	126,95		
2	Concreto impermeabilizado	97,02	0,80	0,84
	Policarbonato	1,80	0,95	
	Plástico	33,16	0,93	
	Superficie (área total)	131,77		
3	Concreto impermeabilizado	351,38	0,80	0,86
	Plástico	6,36	0,93	
	Policarbonato	16,58	0,95	
	Superficie (área total)	374,31		
4	Concreto	53,92	0,86	0,86
	Metal	10,76	0,90	
	Policarbonato	3,97	0,95	
	Loseta	49,44	0,85	
5	Superficie (área total)	118,11		0,84
	Concreto impermeabilizado	45,70	0,80	
	Policarbonato	27,06	0,95	
	Loseta	217,50	0,85	
	Superficie (área total)	291,54		

3.4 Precipitaciones anuales

A continuación, en la Tabla 10, se presentan las precipitaciones estimadas para cada una de las azoteas, con base en su ubicación geográfica. La representación gráfica de estos registros se presenta en la Figura 11.

Para obtener el promedio mensual de precipitaciones $\bar{P}(m)$ se aplicó (2).

Posteriormente, dicho valor se utilizó en (3) para calcular la precipitación anual $\bar{P}(a)$ correspondiente. Cabe señalar que, ante la presencia de vacíos en los registros de las

estaciones meteorológicas, se optó por promediar la información disponible a lo largo de 11 años (entre enero de 2014 y diciembre de 2024). De esta manera, se llenaron las lagunas de datos y se obtuvo un promedio anual completo y consistente.

Tabla 1. Valores de precipitación mensual $\bar{P}(m)$ y anual $\bar{P}(a)$ de las azoteas de estudio, expresados en mm. Fuente: elaboración propia.

Azotea	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
1	1,85	8,20	34,35	0	47,65	117,36	260,66	223,50	189,05	78,9	12,10	19,75	993,38
2	1,85	8,20	34,35	0	47,65	117,36	260,66	223,50	189,05	78,9	12,10	19,75	993,38
3	3,18	4,86	9,33	23	56,46	142,57	178,94	206,51	148,71	93,42	6,77	15,92	889,72
4	3,18	4,86	9,33	23	56,46	142,57	178,94	206,51	148,71	93,42	6,77	15,92	889,72
5	9,6	12,95	13,52	0	46	116,30	143,60	132,76	153,86	80,45	13,77	21,70	744,53

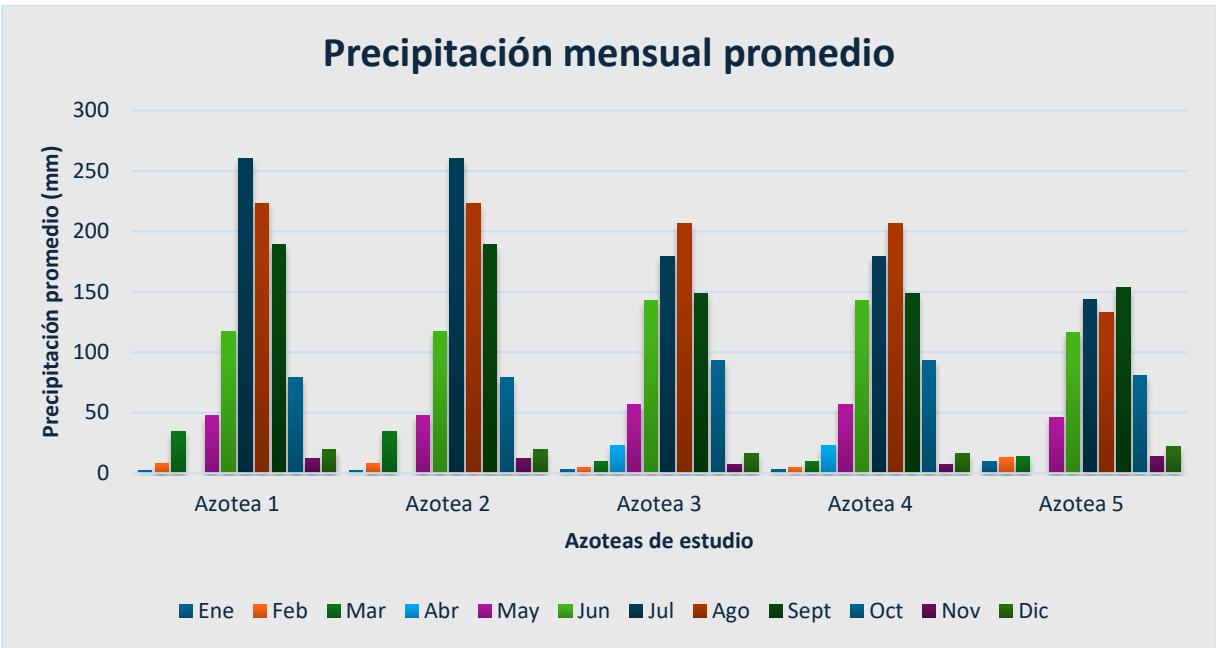


Figura 1. Gráficas de precipitación mensual promedio (mm) para las cinco azoteas de estudio. Fuente: elaboración propia

3.5 Potencial de captación de agua de lluvia

Con la información obtenida en los apartados anteriores, fue posible calcular el potencial de captación de agua de lluvia para cada una de las azoteas, utilizando (4).

En la Tabla 11 se presentan los distintos valores de volumen de captación. Es importante señalar que la precipitación se expresa tanto en milímetros (mm) como en metros (m), con el fin de obtener el volumen en metros cúbicos (m³), que es la unidad adecuada para representar esta variable.

Tabla 2. Precipitación (mm) y volumen mensual (m³) de agua captada en las diferentes azoteas de estudio. Fuente: elaboración propia.

Azotea	Área total A (m ²)	Coeficiente de escurrimiento ponderado C_e	Mes m	Precipitación mensual $\bar{P}(m)$		Volumen de captación V (m ³)
				(mm)	(m)	
1	12.95	0.87	Enero	1.85	0.00	0.00
			Febrero	8.20	0.01	1.10
			Marzo	34.35	0.03	3.31
			Abril	0	0.00	0.00
			Mayo	47.65	0.05	5.52
			Junio	117.36	0.12	13.25
			Julio	260.66	0.26	28.72
			Agosto	223.50	0.22	24.30
			Septiembre	189.05	0.19	20.99
			Octubre	78.90	0.08	8.84
			Noviembre	12.10	0.01	1.10
			Diciembre	19.75	0.02	2.21
			Anual	993.38	0.99	109.73
2	131.77	0.84	Enero	1.85	0.00	0.00
			Febrero	8.20	0.01	1.11
			Marzo	34.35	0.03	3.33
			Abril	0	0.00	0.00
			Mayo	47.65	0.05	5.54
			Junio	117.36	0.12	13.30
			Julio	260.66	0.26	28.82
			Agosto	223.50	0.22	24.39
			Septiembre	189.05	0.19	21.06
			Octubre	78.90	0.08	8.87
			Noviembre	12.10	0.01	1.11
			Diciembre	19.75	0.02	2.22
			Anual	993.38	0.99	109.60
3	374.31	0.86	Enero	2.95	0.00	0.00
			Febrero	2.75	0.00	0.00
			Marzo	9.61	0.01	3.22
			Abril	21.40	0.02	6.44
			Mayo	64.76	0.06	19.31
			Junio	151.95	0.15	48.29
			Julio	158.41	0.16	51.51
			Agosto	193.72	0.19	61.16
			Septiembre	167.04	0.17	54.72
			Octubre	94.48	0.09	28.97
			Noviembre	11.55	0.01	3.22
			Diciembre	13.60	0.01	3.22
			Anual	892.27	0.89	286.75
4	118.11	0.86	Enero	3.18	0.00	0.00
			Febrero	4.86	0.00	0.00
			Marzo	9.33	0.01	1.02
			Abril	23.00	0.02	2.03
			Mayo	56.46	0.06	6.10
			Junio	142.57	0.14	14.22
			Julio	178.94	0.18	18.29
			Agosto	206.51	0.21	21.34
			Septiembre	148.71	0.15	15.24
			Octubre	93.42	0.09	9.14
			Noviembre	6.77	0.01	1.02
			Diciembre	15.92	0.02	2.03
			Anual	889.72	0.89	90.44
5	291.54	0.84	Enero	9.60	.01	2.45
			Febrero	12.95	0.01	2.45
			Marzo	13.52	0.01	2.45
			Abril	0	0.00	0.00
			Mayo	46.00	0.05	12.24
			Junio	116.30	0.12	29.39
			Julio	143.60	0.14	34.28
			Agosto	132.76	0.13	31.84
			Septiembre	153.86	0.15	36.73
			Octubre	80.45	0.08	19.59
			Noviembre	13.77	0.01	2.45
			Diciembre	21.70	0.02	4.90
			Anual	744.53	0.74	183.00

4. DISCUSIÓN

Los volúmenes de captación estimados para las cinco azoteas analizadas, que oscilaron entre 90 m³ y 285 m³ anuales, son comparables en magnitud con los reportados por [12], quienes documentaron un rango de 120 m³ a 310 m³ para techos urbanos utilizados en agricultura en la Ciudad de México. No obstante, los coeficientes de escurrimiento ponderado obtenidos en el presente estudio, con valores entre 0,84 y 0,87, resultan ligeramente superiores al promedio de 0,82 informado en dicho trabajo. Esta diferencia puede atribuirse a una mayor proporción de superficies de concreto impermeabilizado en las azoteas analizadas. Por otra parte, [15] estimaron una captación superior a 11 millones de litros anuales en un campus universitario ubicado en India; sin embargo, tanto la superficie de azotea medida en hectáreas como el régimen pluviométrico de Gurgaon difieren sustancialmente del contexto residencial de la Ciudad de México, lo que explica la divergencia en la escala de los resultados.

En la Tabla 12 se presenta un análisis comparativo entre este estudio y la literatura consultada. Para garantizar una interpretación clara y coherente del trabajo, la comparación se organizó en torno a categorías clave: objetivos, escala espacial, fuentes de datos, metodología de estimación, herramientas empleadas y tipos de resultados obtenidos.

Tabla 12. Síntesis comparativa del estudio actual frente a la literatura consultada.
Fuente: [12], [15], [17] y estudio actual.

Rubro	Roblero Hidalgo y Flores Velázquez	Puppala et al.	Baby et al.	Servin Maravillas et al. (estudio actual)
Objetivos	Generar una metodología para estimar el volumen de captación para su uso en agricultura urbana (lechuga).	Estimar la cantidad de agua cosechable y seleccionar sitios óptimos para tanques de almacenamiento.	Mapear el potencial de captación de agua de lluvia mediante herramientas geoespaciales.	Desarrollar un sistema para estimar el potencial de captación en azoteas usando drones y datos meteorológicos.
Escala espacial	Microescala: Dos techos urbanos con características contrastantes.	Mesoescala: Campus universitario en el distrito de Gurgaon.	Macroescala: Suburbio completo (Wollert, Victoria).	Microescala: Cinco viviendas residenciales en la Ciudad de México.
Fuentes de datos	Imágenes de cámara transportada en Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y normales climatológicas.	Imágenes de alta resolución de VANT y bases de datos espaciales.	Datos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y mapas de superficies.	Imágenes aéreas Red, Green, Blue (RGB) de VANT y datos históricos de la API Meteostat.
Metodología de estimación	Modelo Digital de Superficie (MDS), coeficientes por subárea y cálculo de precipitación media mensual.	Técnica Structure-from-Motion (SfM) para evaluación de áreas y análisis de superposición ponderada.	Análisis basado en ArcGIS para diferentes superficies (techos, vías y espacios abiertos).	Fotogrametría (ortomosaicos), coeficientes de escurrimiento ponderados y modelo matemático anual.
Herramientas	VANT y software de generación de MDS.	VANT y SIG.	Software ArcGIS y herramientas de análisis SIG.	VANT DJI Phantom 4 Pro, Python (Sistema ACUAPOTENCIAL), OpenDroneMap (ODM), Meteostat API.
Tipo de resultados	Volumen de lluvia estimado y análisis agronómico para cultivo de lechuga.	Cantidad anual de agua (m ³) y localización técnica para tanques de almacenamiento.	Potencial anual de cosecha (litros/año) a nivel localidad para diversas superficies.	Volumen de captación anual (m ³) por vivienda y potencial según material de azotea.

El principal aporte de este trabajo radica en la integración de un flujo completo y accesible: captura de imágenes aéreas con el dron Phantom 4 Pro, generación de ortomosaicos mediante OpenDroneMap, cálculo de áreas, coeficientes de escurrimiento ponderados y potencial de captación en Python, así como uso de datos históricos gratuitos de Meteostat. A diferencia de estudios que dependen exclusivamente de SIG comerciales o de datos pluviométricos de pago, la metodología planteada valida las estimaciones de área frente a escrituras oficiales, lo que otorga un nivel adicional de confiabilidad a los resultados y permite su réplica en contextos urbanos con recursos limitados.

Los resultados obtenidos ofrecen guías cuantitativas para la toma de decisiones a nivel doméstico y municipal. Por ejemplo, el concreto impermeabilizado contribuye de manera destacada al volumen total de captación principalmente porque cubre la mayor superficie en las azoteas estudiadas, y no porque sea más eficiente para escurrir agua. A nivel de política pública, estos resultados pueden orientar la focalización de sistemas de captación en las azoteas con mayores áreas disponibles y contribuir a la investigación o el uso de recubrimientos y materiales que, combinados con la superficie adecuada, maximicen el rendimiento de los sistemas de recolección de agua de lluvia. Asimismo, la adopción de Meteostat como fuente de datos climáticos demuestra la viabilidad de soluciones de bajo costo para estudios hidrológicos urbanos.

Este estudio se realizó sobre un conjunto pequeño de cinco azoteas, todas ubicadas en la Ciudad de México, y con un periodo de análisis de precipitación de 2014 a 2024. El tamaño del conjunto se debió al corto tiempo disponible para el proyecto, replicándolo como trabajo futuro en un conjunto más amplio.

Aunque las escrituras oficiales validaron con alta precisión los cálculos de área, no se incorporó una validación in situ del volumen real recolectado tras eventos de lluvia. Futuras investigaciones podrían ampliar la muestra geográfica y temporal, incluir sensores de nivel de agua para comparar estimaciones con volúmenes reales y explorar la integración de datos en tiempo real (p. e. j., estaciones de lluvia automáticas) para mejorar la precisión y aplicabilidad del modelo.

5. CONCLUSIONES

Desde el inicio de este estudio se planteó la necesidad de afrontar la creciente escasez de agua en zonas urbanas mediante soluciones innovadoras y sostenibles. Para ello se desarrolló una metodología integradora que combinó imágenes aéreas capturadas por dron (fotogrametría), el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos climáticos históricos para estimar el potencial de captación en azoteas de la Ciudad de México. La validación de los cálculos de área a través de escrituras oficiales y la obtención de resultados consistentes; potenciales de captación que oscilan entre 90 m³ y 286 m³ anuales (90 000 L–286 000 L), confirman la viabilidad y precisión del método propuesto. Al convertir estos volúmenes a litros y dividirlos entre el consumo doméstico promedio de 380 L/día por persona [6], se obtiene un aproximado de 237 a 753 días de agua, lo cual facilita comprender de manera clara el impacto real que la captación pluvial podría tener en el abastecimiento de un hogar típico.

El desarrollo del estudio permitió identificar que el concreto impermeabilizado contribuye de manera destacada al volumen total de captación, principalmente porque cubre la mayor superficie en las azoteas estudiadas y no porque sea más eficiente para escurrir agua. Además, la segmentación de los datos en promedios mensuales ha abierto la puerta a futuras investigaciones para desarrollar un módulo destinado a determinar el dimensionamiento óptimo de un tanque de almacenamiento. Dicho módulo, basado en los valores mensuales de captación, permitiría calcular la capacidad necesaria para retener los picos de lluvia durante la temporada húmeda y garantizar el suministro en periodos secos.

En definitiva, este trabajo no solo confirma la posibilidad de aprovechar tecnologías accesibles para gestionar de manera más eficiente el recurso hídrico, sino que también sienta las bases para ampliar el estudio a una escala distrital. La integración de estos elementos podría contribuir a transformar el manejo del agua en entornos urbanos, promoviendo soluciones replicables y sostenibles en el tiempo.

6. ACERCA DEL ARTÍCULO

Conflictos de interés:

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses, financiero, personal o institucional, que pudiera haber influido de manera inapropiada en el desarrollo de la investigación o en la presentación de los resultados aquí expuestos.

Contribución de autoría:

Alejandro Servin Maravillas: Desarrollo de software (sistema "ACUAPOTENCIAL" en Python), validación, análisis formal, investigación (operación del dron y adquisición de datos RGB), curación de datos, redacción del borrador original y visualización.

Silvia Beatriz González Brambila: Supervisión, conceptualización, metodología, administración del proyecto y del vehículo aéreo no tripulado (VANT), revisión y edición del manuscrito.

Danny Arroyo Espinoza: Supervisión, apoyo en pilotaje del VANT y metodología, asesoramiento en temas de ingeniería civil, revisión y edición del manuscrito.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos:

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Azcapotzalco por el apoyo institucional recibido. De manera especial, se agradece al Departamento de Sistemas de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería por el préstamo del vehículo aéreo no tripulado (VANT) DJI Phantom 4 Pro, equipo esencial para la captura de datos fotogramétricos de esta investigación. Asimismo, se agradece a los propietarios de las viviendas ubicadas en las alcaldías Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y Benito Juárez por las facilidades brindadas para la realización de los vuelos.

Financiación: Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de agencias de financiación de los sectores público, comercial o sin fines de lucro. Los recursos técnicos y operativos fueron proporcionados por la institución y los autores como parte de un proyecto de titulación.

REFERENCIAS

- [1] Gobierno de México, "Educación ambiental y Cultura del Agua, Por la Comisión Nacional del Agua," gob.mx. Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/semarnat/educacionambiental/es/articulos/educacion-ambiental-y-cultura-del-agua?idiom=es>
- [2] United States Geological Survey, "How Much Water is There on Earth?," usgs.gov. Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth>
- [3] United Nations Educational and Scientific, and Cultural Organization, "Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Alianzas y cooperación por el agua," unesco.org. Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/es>

- [4] CONAGUA, "Estadísticas del Agua en México 2023 Comisión Nacional del Agua," Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, 2023. Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- [5] World Health Organization, *Right to water*, Ginebra, Suiza: World Health Organization, 2003. https://www2.ohchr.org/english/issues/water/docs/Right_to_Water.pdf
- [6] SEDEMA, and Unidad de Estudios de Finanzas Públicas, "Manejo sustentable del agua. Ciudad de México," México, 2021. Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.congresocdmx.gob.mx/archivos/finanzas/infografiamanejosustentabledeलाqua2022.pdf>
- [7] Meteostat, "El Guardián del Tiempo," meteostat.net, Accessed: Apr. 11, 2025. [Online]. Available: <https://meteostat.net/es/>
- [8] G. Sámano Romero, "Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en la academia mexicana de ciencias" Tesis de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, 2017. <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2017/marzo/0757069/0757069.pdf>
- [9] H. Wei, J.-L. Li, and T.-G. Liang, "Study on the estimation of precipitation resources for rainwater harvesting agriculture in semi-arid land of China," *Agric. Water Manag.*, vol. 71, no. 1, pp. 33–45, Jan. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.07.002>
- [10] N. De la luz Itzel, E. Flores Valverde, and M. R. Valladares Rodríguez, "Captación, calidad y uso del agua de lluvia," *Revista tendencias en docencia e investigación en química*, vol. 8, no. 8, pp. 235–241, Dec. 2022. <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/e596ca7c-dba8-4212-9ec0-e68f88fd3ea5/content>
- [11] NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Lí-mites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, Secretaría de Gobernación SEGOB, Secretaría de Salud, and Diario Oficial de la Federación, NOM-127-SSA1-1994. México, 1994. Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866379&fecha=18/01/1996#gsc.tab=0
- [12] R. Roblero, and J. Flores, "Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana," *Vivienda y Comunidades Sustentables*, no. 11, pp. 111–124, Jan. 2022. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.197>
- [13] ESRI, "Diccionario SIG, Superposición Ponderada," esri.com. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/weighted-overlay>
- [14] ESRI, "Qué es SIG?, Sistemas de Información Geográfica (SIG)," esri.com. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.sigsa.info/es-mx/what-is-gis/overview>
- [15] H. Puppala, P. R. T. Peddinti, B. Kim, and M. K. Arora, "Unmanned aerial vehicles for planning rooftop rainwater harvesting systems: a case study from Gurgaon, India," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 23, no. 5, pp. 2014–2030, Apr. 2023. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.105>
- [16] ArcGIS Enterprise, "¿Qué es ArcGIS for Server," arcgis.com. Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: <https://enterprise.arcgis.com/es/server/10.3/get-started/windows/what-is-arcgis-for-server-htm>
- [17] S. N. Baby, C. Arrowsmith, and N. Al-Ansari, "Application of GIS for mapping rainwater-harvesting potential: Case study Wollert, Victoria," *Engineering*, vol. 11, no. 01, pp. 14–21, Jan. 2019. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=89981>
- [18] Dà-Jiāng Innovations DJI, "Nosotros – DJI," dji.com. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.dji.com/mx/company>
- [19] Dà-Jiāng Innovations DJI, "Phantom 4 Pro - Centro de descargas – DJI," dji.com. Accessed: Mar. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.dji.com/mx/downloads/products/phantom-4-pro#doc>
- [20] Al-Top Topografía, "DJI Flight Simulator Sumérgete en una experiencia de vuelo realista," al-top.com. Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://al-top.com/producto/dji-flight-simulator/>
- [21] Google, "Google Earth El globo terráqueo más completo," google.es. Accessed: May 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- [22] Dà-Jiāng Innovations DJI, "DJI Go 4 - Centro de descargas – DJI," dji.com. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.dji.com/mx/downloads/djiapp/dji-go-4>
- [23] Pix4D, "Compatible con las principales marcas de drones Soluciones de software agnósticas al hardware, compatibles con los modelos de drones más comunes," pix4d.com. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.pix4d.com/es/drones-compatibles/>
- [24] Drone Harmony, "The Operating System for Capturing Critical Infrastructure Imagery & Insights," droneharmony.com. Accessed: May 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.droneharmony.com/>
- [25] Dà-Jiāng Innovations DJI, "FLYSAFE," dji.com. Accessed: May. 06, 2025. [Online]. Available: <https://fly-safe.dji.com/home>

- [26] Usach, and Centro de Innovación Facultad de Ingeniería Usach, "Phantom 4 Pro," centroinnovacion.cl. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: <https://centroinnovacion.cl/ficha-tecnica-phantom-4-pro/>
- [27] Mappa, "Interactive Travel Mapping Apps and Trip Planning Tools," map.org. Accessed: Aug. 15, 2024. [Online]. Available: <https://mappa.ag/es/blog/ortomosaico/>
- [28] Open Drone Map ODM, "Drone Mapping Software – OpenDroneMapTM," opendronemap.org. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://opendronemap.org/>
- [29] QGIS, "Spatial without Compromise," qgis.org. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://qgis.org/>
- [30] ESRI, "ESRI Shapefile Technical Description," esri.com. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: <https://support.esri.com/en-us/technical-paper/esri-shapefile-technical-description-279>
- [31] M. G. Barnes, "GitHub-Streamlit, Codes," github.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/streamlit/streamlit>
- [32] Ocefpa, "GitHub-python-visualization/folium," github.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/python-visualization/folium>
- [33] K. Jordahl et al., *geopandas/geopandas*. (2020, v0.8.1). USA. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3946761>
- [34] S. Gillies, "GitHub-rasterio/rasterio: Rasterio reads and writes geospatial raster datasets," github.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/rasterio/rasterio>
- [35] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D graphics environment," *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, May–Jun. 2007. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- [36] M. Waskom, "seaborn: statistical data visualization," *J. Open Source Softw.*, vol. 6, no. 60, p. 3021, Apr. 2021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>
- [37] C. R. Harris et al., "Array programming with NumPy," *Nature*, vol. 585, no. 7825, pp. 357–362, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- [38] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *Proceedings of the Python in Science Conference*, Austin, Texas, 2010, pp. 56–61. <https://doi.org/10.25080/MAJORA-92BF1922-00A>
- [39] K. Esmukov, "GitHub - geopy/geopy: Geocoding library for Python," github.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/geopy/geopy>
- [40] J. M. Manso, and A. Martínez De Azagra, "Diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas: tamaño del microembalse y relación entre el área de impluvio y el área de recepción," *Investigaciones Geográficas*, no. 40, pp. 201–226, Dec. 2006. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17604010.pdf>
- [41] A. León Agatón, J. C. Córdoba Ruiz, and U. F. Carreño Sayago, "Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos," *Revista Tecnura*, vol. 20, no. 50, pp. 141–153, Sep. 2016. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/11567/12826>
- [42] L. A. Muñoz Castro, "Estimación de coeficientes de escurrimiento para la región hidrológica número 23 Costa de Chiapas usando métodos estadísticos," Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma, México, 2015. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/estimacion-de-coeficientes-de-escurrimiento-para-la-region-hidrologica-numero-23-costa-de-chiapas-usando-metodos-est-101352>
- [43] Meteostat, "Python Library | Meteostat Developers," meteostat.net. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://dev.meteostat.net/python/>
- [44] Nintendo, "Drone World Tour: Flight Simulator," nintendo.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. <https://www.nintendo.com/es-mx/store/products/drone-world-tour-flight-simulator-switch/?srsltid=AfmBOoqF7fqpylpCsIcG9ur5p7zpMSdpZC0NdXKB4NrBm4539CwhMDE4>
- [45] Open Drone Map (ODM), "Drone Mapping Software," opendronemap.org. Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://opendronemap.org/webodm/>
- [46] P. Fernando, "GitHub-microsoft/Streamlit_UI_Template: CSS template to modify and enhance the appearance of Streamlit applications," github.com. Accessed: May. 08, 2025. [Online]. Available: https://github.com/microsoft/Streamlit_UI_Template
- [47] D. Poudel, "GitHub-JupyterLab computational environment," github.com. Accessed: Apr. 14, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/jupyterlab/jupyterlab>
- [48] Meteostat Developers, "Weather Stations," meteostat.net. Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://dev.meteostat.net/python/stations.html>