

Cosecha de lluvia en zona urbana para mitigar escasez hídrica: Un análisis comparativo bajo distintos escenarios

Rainwater harvesting in urban areas to mitigate water shortages: A comparative analysis of different scenarios

E. Garrido-Amador ^a, V. Volpi-León ^{a,*}, J.C. Seck-Tuoh-Mora ^a, L. Lizárraga-Mendiola ^a, C. A. Bigurra-Alzati ^a, A. D. Juárez-Sedano ^a

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

La escasez hídrica constituye un desafío global, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la urbanización y la sobreexplotación de acuíferos limitan la disponibilidad de agua. En México, estas condiciones se acentúan por la insuficiencia de infraestructura hidráulica, afectando la seguridad hídrica urbana. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) en una zona habitacional de Mineral de la Reforma, Hidalgo, mediante indicadores urbanos, hidrológicos y demográficos que permiten cuantificar infiltración, escorrentía y suficiencia hídrica. La metodología consideró tres escenarios comparativos: (1) situación actual, dependiente del suministro público; (2) captación pluvial en azoteas de viviendas; y (3) captación en viviendas, áreas comerciales y de servicios. Se aplicaron parámetros de precipitación, áreas de captación y dotaciones mínimas normativas para estimar la disponibilidad y suficiencia del recurso. Los resultados muestran que en el escenario actual más del 60 % de la lluvia se pierde como escorrentía. En viviendas dúplex y cuádruplex, la captación superó la demanda mínima, mientras que en multifamiliares la alta densidad de sus habitantes redujo la eficiencia. La inclusión de comercios y servicios generó excedentes redistribuibles, configurando un modelo de micro-red hídrica urbana. Se concluye que los SCALL, integrados con tecnologías de bajo impacto y estrategias de redistribución, representan una alternativa viable y sostenible para mitigar la escasez y fortalecer la resiliencia hídrica en contextos urbanos semiáridos.

Palabras Clave: Tecnologías de Bajo Impacto, cosecha de lluvia, indicadores, escasez hídrica.

Abstract

Water scarcity poses a significant global challenge, particularly in arid and semi-arid regions, where urbanization and aquifer overexploitation limit water availability. In Mexico, these conditions are exacerbated by inadequate hydraulic infrastructure, which undermines urban water security. The objective of this study was to evaluate the potential of Rainwater Harvesting Systems (RHS) in a residential area of Mineral de la Reforma, Hidalgo, through the use of urban, hydrological, and demographic indicators that quantify infiltration, runoff, and water sufficiency. The methodology considered three comparative scenarios: (1) the current situation, reliant on public supply; (2) rainwater harvesting on residential rooftops; and (3) harvesting across residential, commercial, and service areas. Results indicate that in the current scenario, more than 60 % of rainfall is lost as runoff. In duplex and quadruplex housing units, harvesting exceeded the minimum demand, while in multifamily buildings, high population density reduced efficiency. The inclusion of commercial and service rooftops generated redistributable surpluses, shaping a model of an urban micro-water network. It is concluded that RHS, integrated with low-impact development technologies and redistribution strategies, represent a viable and sustainable alternative to mitigate scarcity and strengthen water resilience in semi-arid urban contexts.

Keywords: Low-Impact Development, rainwater harvesting, indicators, water scarcity.

*Autor para correspondencia: volpi@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ga303553@uaeh.edu.mx (Eduardo Garrido-Amador), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi-León), jseck@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Seck-Tuoh-Mora), mendiola@uaeh.edu.mx (Liliana Lizárraga-Mendiola), carlos.bigurra@uaeh.edu.mx (Carlos Alfredo Bigurra-Alzati), ajuarez@uaeh.edu.mx (Alma Delia Juárez-Sedano)

Historial del manuscrito: recibido el 26/07/2025, última versión-revisada recibida el 17/09/2025, aceptado el 24/10/2025, publicado el 05/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15583>



1. Introducción

La escasez hídrica se ha consolidado como un desafío recurrente a escala global, particularmente en las zonas áridas y semiáridas, muchas de ellas localizadas en países del Sur Global, donde la gestión del recurso resulta ineficiente (Koncagul *et al.*, 2024). De acuerdo con (Morote y Hernández, 2016), el acelerado proceso de urbanización en ciudades caracterizadas por precipitaciones limitadas y suelos con baja capacidad de retención hídrica ocasiona una problemática de gran magnitud. Esto ocurre porque, al no incorporar el ciclo hidrológico como eje rector en la planeación urbana ni en el diseño de los sistemas hidrosanitarios, el riesgo de una escasez permanente del recurso se intensifica (Espíndola, 2017). En estas regiones áridas y semiáridas, cerca de 2,500 millones de personas dependen del agua subterránea como fuente principal de abastecimiento, lo que representa aproximadamente el 50 % del consumo mundial de agua potable (Noori y Singh, 2023). Esta dependencia se explica porque la extracción subterránea ha resultado económicamente accesible en grandes volúmenes, lo que ha propiciado una explotación excesiva (López-Hernández *et al.*, 2017).

En este escenario, la captación de agua de pluvial se ha consolidado como una alternativa para complementar las fuentes tradicionales de suministro. Para ello se emplean tecnologías que permiten recolectar y almacenar el agua procedente de los tejados mediante métodos sencillos, como el uso de macetas, tanques y cisternas (Abdulla y Al-Shareef, 2009). Esta práctica se remonta a las civilizaciones más antiguas. Un ejemplo notable se encuentra en las zonas montañosas de Yemen, en Medio Oriente, donde se han hallado templos y espacios de oración fechados alrededor del año 1000 a.C., dotados de patios y terrazas diseñados para captar y conservar el agua de lluvia (Hugues, 2019). De manera similar, en el Imperio Maya, hacia el siglo X a.C., se construyeron cisternas subterráneas conocidas como chultunes, de aproximadamente cinco metros de diámetro y recubiertas con yeso para asegurar su impermeabilidad (Hugues, 2019).

En la actualidad, la captación de agua pluvial se ha consolidado como una práctica relevante en diversos países africanos, especialmente en las ciudades de la costa norte, donde se ha identificado un alto potencial de aprovechamiento. En Alejandría, por ejemplo, la recolección de lluvia ha permitido cubrir aproximadamente el 12 % de la demanda doméstica, mientras que en las regiones centrales y del sur del país las precipitaciones resultaron insuficientes para su aprovechamiento (Gado y El-Agha, 2020). En naciones como Ghana y Sudáfrica se ha formulado una estrategia nacional destinada a orientar al sector hídrico en la promoción de los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) (Umuiza *et al.*, 2023). En Etiopía, se han implementado tanques de ferrocemento con capacidad de hasta 60 m³ para la recolección pluvial (Garmendia *et al.*, 2021), mientras que en Guinea-Bissau se desarrollaron cisternas de Calabash con capacidad de 5000 litros, diseñadas para ser accesibles económicamente a la mayoría de la población (Akkerman, 2020). En la meseta de Thiès, Senegal, se instalaron sistemas de captación que emplean techos inclinados de lámina corrugada para conducir el agua hacia depósitos de almacenamiento (Ndour *et al.*, 2020). Por su parte, en Marruecos se han impulsado prácticas como la construcción de pequeñas presas, cisternas

y embalses subterráneos conocidos como khetaras, que suministran agua tanto para riego como para uso comunitario (Umuiza *et al.*, 2023). Estos ejemplos provenientes de las zonas áridas y semiáridas de África muestran que la implementación de SCALL constituye una alternativa prometedora y sostenible para otros países con condiciones similares.

En México, una parte significativa del territorio presenta alta vulnerabilidad frente a la sequía: aproximadamente el 52 % del país se clasifica como árido o semiárido, lo que equivale a catorce estados ubicados principalmente en las regiones norte y centro (Esparza, 2014). Entre los principales desafíos vinculados con la escasez de agua destacan los efectos del cambio climático, la sobreexplotación de cuencas y acuíferos estratégicos, así como la contaminación que afecta hasta al 70 % de los cuerpos de agua. A ello se suman el aumento de conflictos derivados de la competencia por el acceso al recurso, la ausencia de medidas suficientes para proteger humedales y otras fuentes hídricas, el uso ineficiente del agua y la obsolescencia de la infraestructura hidráulica existente. Además, considerando el ritmo actual de inversión, se calcula que serían necesarios al menos 24 años para contar con una infraestructura capaz de garantizar la sustentabilidad y la seguridad hídrica en el país (Arreguín-Cortés *et al.*, 2020).

En este contexto, la adopción del SCALL se plantea como una alternativa factible a corto plazo para subsanar las limitaciones de la infraestructura hídrica existente (Cantu Vela *et al.*, 2020). En distintas regiones del país, la cosecha pluvial se ha propuesto como respuesta a esta problemática. Un ejemplo es la comunidad rural de Los Achotes, en el municipio de San Luis Acatlán, Guerrero, donde se estimó el potencial de captación en 11 viviendas mediante un sistema que incluía procesos de purificación. Este proyecto evidenció beneficios económicos, sociales -gracias a la capacitación brindada a las familias- y ambientales (Avelar Roblero *et al.*, 2019). La implementación de estas tecnologías ha sido más frecuente en zonas rurales, donde la construcción de infraestructura convencional de abastecimiento resulta poco viable (Hdeib y Aouad, 2023).

De manera complementaria, algunos estudios han explorado su viabilidad en ámbitos urbanos y en unidades habitacionales múltiples. En la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), por ejemplo, se evaluó el uso de SCALL en azoteas de viviendas colectivas de distintos municipios. Los resultados revelaron que, aunque el impacto a pequeña escala sería limitado respecto a otras regiones del país, el almacenamiento en cisternas podría representar un aporte útil para el riego de parques y jardines (López *et al.*, 2016). En el centro del país, en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, se desarrolló una metodología para calcular el potencial de captación en un edificio considerando su consumo y capacidad de almacenamiento. Los resultados sugirieron que el sistema podría cubrir el 100 % de la demanda de agua, si bien se trató de un análisis preliminar en un inmueble con baja concurrencia (Solórzano-Villarreal *et al.*, 2019). Asimismo, en unidades de interés social en Pachuca, Hidalgo, se elaboraron guías para simular la recolección pluvial. Dichas simulaciones mostraron que, con base en la precipitación y el espacio disponible, es posible cubrir parcialmente la demanda en usos específicos como sanitarios, limpieza de pisos y automóviles, riego de jardines y lavado de ropa (Ávila, 2013).

Siguiendo una perspectiva semejante, el presente estudio examina la aplicación de los SCALL en una zona habitacional del estado de Hidalgo, ubicado en la región centro de México y caracterizado por un clima semiárido. El análisis numérico se orienta a estimar el volumen de agua pluvial potencialmente aprovechable bajo tres escenarios distintos. Dicho análisis contempla tanto la unidad habitacional como su infraestructura urbana complementaria y las áreas comerciales, todos ellos espacios con condiciones propicias para la captación. Para ello, se integran tres dimensiones fundamentales -hidrológica, urbana y demográfica- con el propósito de establecer parámetros e indicadores que faciliten la evaluación del potencial de aprovechamiento de la cosecha de agua.

El trabajo se organiza en cinco apartados principales. El primero corresponde a la introducción. En la segunda sección se describe la zona de estudio, destacando sus características físicas y climáticas, así como la tecnología de bajo impacto propuesta. La tercera sección se centra en la estimación de la demanda de agua a partir de parámetros e indicadores pertinentes. La cuarta sección examina los tres escenarios planteados:

- Escenario 1: situación actual, en la que se identifican los volúmenes de agua que no son aprovechados.
- Escenario 2: aplicación de tecnologías de bajo impacto para recolectar el agua de lluvia acumulada en las azoteas de viviendas.
- Escenario 3: aplicación de estas tecnologías para captar agua pluvial en azoteas de viviendas, áreas comerciales y equipamientos urbanos.

Finalmente, la quinta sección expone la discusión de resultados y las conclusiones.

2. Análisis de la zona de estudio

2.1. Localización del área y su clima

El área de estudio se localiza en el municipio de Mineral de la Reforma, en el estado de Hidalgo, dentro de la zona metropolitana de Pachuca de Soto y en la región geográfica de la Cuenca de México (Figura 1). En este estudio se seleccionó como zona de análisis una zona habitacional localizada a una altitud media de 2,342 metros sobre el nivel del mar hacia la salida a Ciudad Sahagún. Para este análisis, los datos climatológicos se obtuvieron de la estación Pachuca (clave CONAGUA 13022), la más próxima al sitio de investigación. El clima de Pachuca de Soto es semiárido templado, clasificado como BS1kwigw según la tipología de Köppen (García de Miranda, 1981), con una temperatura media anual de 15.5 °C. El régimen pluvial se concentra entre junio y octubre, con una precipitación media anual de 581 mm. Diciembre constituye el mes más seco, con apenas 2.9 mm de lluvia, mientras que en julio se registra el mayor promedio, alcanzando hasta 50.3 mm en un día con lluvia intensa.

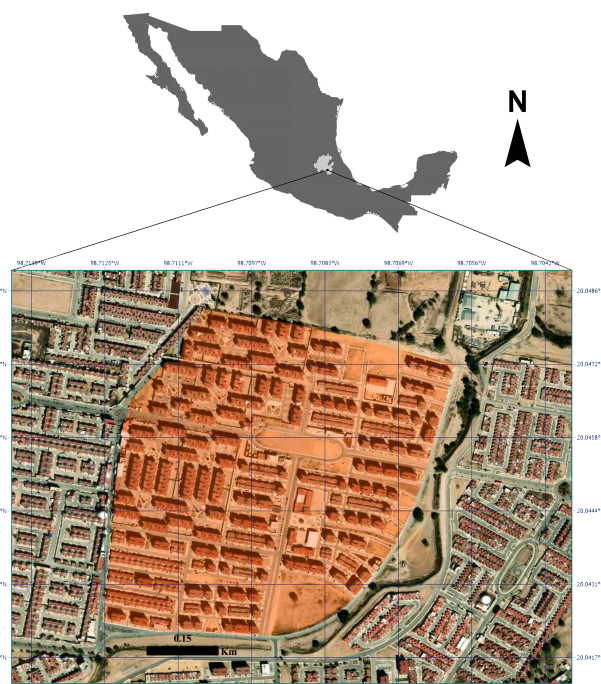


Figura 1: Zona de estudio dentro del fraccionamiento. Fuente: Google Maps.

2.2. Datos poblacionales y áreas del fraccionamiento

Se llevó a cabo la identificación del tipo y uso del suelo con el propósito de determinar las áreas potencialmente disponibles para la captación de agua pluvial. El fraccionamiento cuenta con una superficie total de 477,868.39 m², distribuida en distintos tipos de cobertura: 34,123.32 m² de áreas verdes, 256,398.82 m² correspondientes a vialidades y banquetas, 101,005.04 m² de superficies desnudas (baldíos y parques) y 86,341.21 m² de azoteas, ver Tabla 1.

Tabla 1: Tipos de superficie

Tipo de superficie	Porcentaje
Superficies verdes	7.2 %
Superficies desnudas	53.6 %
Banquetas y vialidades	21.1 %
Azoteas	18.1 %

Respecto al uso de suelo, se registraron 13,312.02 m² destinados a áreas comerciales, 49,672.52 m² a áreas de donación y 27,079.38 m² a zonas de servicios. En el ámbito comercial, se identificaron 39 establecimientos con capacidad para 156 empleados, considerando un promedio de cuatro personas por local en dos turnos, además de 5,022.87 m² de estacionamientos. Las áreas de servicios comprenden 28 espacios de equipamiento urbano con capacidad para 7,939 personas. En lo que respecta al uso habitacional, el fraccionamiento dispone de 5,299 viviendas, distribuidas en cinco tipos de unidades, con un promedio de 3.60 habitantes por vivienda, lo que equivale a una población de 19,076 personas vinculadas al uso doméstico.

El incremento poblacional y la problemática de escasez de agua en la zona han convertido este fraccionamiento en un caso de estudio relevante para evaluar los beneficios potenciales de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). El análisis busca estimar el consumo de la población y contrastarlo con los volúmenes de agua que podrían recolectarse, a fin de determinar si estos serían capaces de cubrir parcial o totalmente la demanda. Asimismo, la relación entre las áreas de captación disponibles y la densidad habitacional permite proyectar el fraccionamiento como un modelo replicable en otras localidades, contribuyendo a un enfoque integral para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos.

2.3. Sistema de captación de agua de lluvia (SCALL)

La captación o cosecha de agua de lluvia es la acción de recolectar, conducir, almacenar y tratar el agua que se precipita a la superficie terrestre para su uso o consumo (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020).

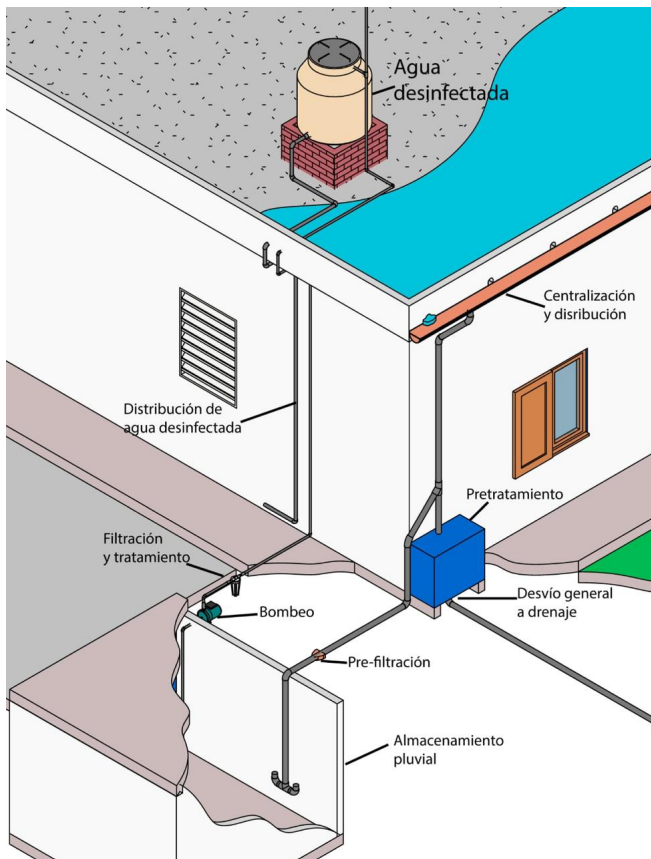


Figura 2: Sistema de Captación de Agua de Lluvia (Figura generada por Gemini, Google, 2025)

Cada sistema comprende los siguientes componentes:

1. Superficie de captación: Se refiere al área de azotea que recolecta y conduce el agua de lluvia hacia canaleta (Anaya-Garduño *et al.*, 2021).
2. Canaletas y bajantes: son los accesorios que permiten centralizar y distribuir el agua a un sistema de pretratamiento (Anaya-Garduño *et al.*, 2021).
3. Unidad de almacenamiento: este componente se encarga de almacenar el agua de escorrentía recolectada hasta su

utilización (puede incluir sistema de filtración, tratamiento y desinfección) (Umukiza *et al.*, 2023).

3. Descripción de las variables de estudio

En esta sección se expondrán los diferentes tipos de variables utilizadas en este estudio. Para los datos de precipitación se tomó la información de la estación meteorológica 13022 y de la base de datos CLICOM (CONAGUA, 2024).

3.1. Variables urbanas

Con base en el tipo de uso de suelo, se identificaron nueve categorías de azoteas dentro del fraccionamiento y siete en la zona de estudio. De estas, cinco corresponden a unidades habitacionales, con las siguientes superficies: 752.29 m² en azoteas dúplex, 18,016.92 m² en azoteas cuádruplex, 5,861.47 m² en multifamiliares de 15 viviendas, 28,255.77 m² en multifamiliares de 20 viviendas y 8,195.01 m² en multifamiliares de 30 viviendas.

En el caso del uso de suelo comercial, se consideró un único tipo de azotea para las 39 unidades comerciales, alcanzando una superficie total de 11,720.03 m². Para el uso de suelo destinado a servicios, se contabilizó también un tipo de azotea correspondiente a los 28 equipamientos urbanos, con una superficie acumulada de 13,539.69 m².

En suma, la superficie total de azoteas potencialmente aprovechables para la captación de agua de lluvia en el fraccionamiento asciende a 86,341.22 m², como se describe en la Tabla 2. Este análisis permite precisar las áreas disponibles para implementar sistemas de recolección pluvial de manera eficiente.

Tabla 2: Áreas de azoteas por uso de suelo

Tipo de azotea	Viviendas	m ² por azotea	m ² totales
Dúplex	30	25.08	752.29
Cuádruplex	724	24.89	18,016.92
Multi 15	585	10.02	5,861.47
Multi 20	3,120	9.06	28,255.77
Multi 30	840	9.76	8,195.05
Comercio	39	300.51	11,720.03
Servicios	28	483.56	13,539.69
Total	5,366	862.88	86,341.22

3.2. Variables hidrológicas

Para el desarrollo del estudio se simuló un evento de lluvia torrencial sobre toda la superficie del fraccionamiento, el cual generó una acumulación de 23.5 mm en un periodo de 30 minutos, por ser un evento característico en la ciudad durante la temporada de lluvias. Esta simulación permitió evaluar las dinámicas de captación considerando dos variables fundamentales: los coeficientes de infiltración y de escorrentía.

El coeficiente de infiltración se aplicó para estimar la proporción de agua que puede ser absorbida por el suelo en función de sus características. Dentro del fraccionamiento, las áreas con mayor capacidad de infiltración corresponden a los jardines, donde la vegetación favorece la retención, seguidas de los suelos desnudos que, aun sin cubierta vegetal, permiten cierto nivel de absorción, mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3: Coeficientes de absorción por tipo de superficie (CONAGUA, 2018)

Tipo de superficie	%
Jardines verdes	0.87
Suelos desnudos	0.57

En contraste, el coeficiente de escorrentía se utilizó para estimar la fracción de agua que no logra infiltrarse y fluye superficialmente. Las vialidades, banquetas y las azoteas de concreto se identificaron como las superficies con mayor escorrentía debido a su impermeabilidad, como se observa en la Tabla 4.

El análisis de estas variables hidrológicas ofrece una comprensión más detallada del comportamiento del agua pluvial en el fraccionamiento, lo que contribuye a identificar tanto los desafíos como las oportunidades para optimizar su gestión mediante sistemas de captación.

Tabla 4: Coeficientes de escurrimiento por tipo de superficie (CONAGUA, 2018)

Tipo de superficie	Coeficiente
Jardines verdes	0.13
Suelos desnudos	0.43
Banquetas y vialidades	0.95
Concreto de azotea	0.765

3.3. Variables demográficas

Se definió la dotación mínima de agua por persona en función del tipo de uso de suelo, con el propósito de establecer los volúmenes necesarios para cubrir las demandas básicas. Para el uso doméstico se fijó un requerimiento de 0.125 m³ por persona, mientras que para el uso comercial se estableció un mínimo de 0.04 m³ por persona (CONAGUA, 2018).

Estos parámetros se compararon con el suministro real (SR), el cual resultó considerablemente inferior en algunos casos. En el ámbito doméstico, el suministro alcanzó únicamente 0.042 m³ por persona, y en el comercial 0.017 m³ por persona. La única coincidencia se observó en el uso de suelo destinado a servicios, donde el suministro fue de 0.02 m³ por persona.

Este contraste evidencia la brecha existente entre las necesidades básicas y la disponibilidad real, señalando las áreas críticas que requieren atención para optimizar la gestión y distribución del recurso hídrico en el fraccionamiento.

4. Resultados y discusión

Los cálculos realizados tuvieron como propósito estimar la demanda de agua a partir de la información derivada de las variables de estudio. La definición de parámetros e indicadores utilizados en el artículo se toman de Volpi-León *et al.* (2024). Los resultados obtenidos muestran de qué manera las características urbanas inciden en la capacidad de captación y almacenamiento del recurso durante episodios de precipitación intensa.

4.1. Parámetros Urbano-Hidrológicos

De acuerdo con la simulación de una lluvia torrencial de 30 minutos, se calculó el volumen total de agua recibida (AR) en

los 477,868.39 m² del área total del fraccionamiento empleando la Ecuación 1.

$$AR = pa * as \quad (1)$$

Donde pa es la precipitación anual y as el área de la superficie de estudio, obteniendo un volumen total de agua recibida de 11,229.91 m³ en la superficie total del fraccionamiento.

Del volumen total de agua recibida en la superficie del fraccionamiento, 2050.61 m³ de agua es absorbida por las superficies verdes y desnudas dentro de la zona de la estudio, ver tabla 1. La cantidad de agua absorbida (AB) se calculó empleando la Ecuación 2.

$$AB = ts_i * pa * cts_i \quad (2)$$

Donde ts_i es el tipo de suelo y cts_i el coeficiente de absorción por tipo de suelo, ver Tabla 5.

Tabla 5: Agua absorbida por tipo de superficie

Tipo de superficie	m ³
Superficies verdes	697.65
Superficies desnudas	1352.96
Agua total absorbida	2050.61

Para el cálculo del agua total no aprovechada (AN), resultado del escurrimiento, se empleó la Ecuación 3.

$$AN = \sum ts_i * pa * ce_i \quad (3)$$

Donde ce_i es el coeficiente de escorrentía por tipo de suelo, obteniendo un total de 6,849.00 m³ de agua total no aprovechada, distribuida en las superficies verdes, superficies desnudas, banquetas y vialidades del área de estudio, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Agua no aprovechada

Tipo de superficie	m ³
Superficies verdes	104.25
Superficies desnudas	1020.66
Banquetas y vialidades	5724.10
Agua total no aprovechada	6849.00

De la misma lluvia torrencial, se calculó el volumen total de agua recibida en los 9 tipos de azotea empleando la Ecuación 4.

$$AZ = tz_i * pa * 0.765 \quad (4)$$

Donde AZ se refiere al agua cosechada en azotea, tz_i es el área total de cada tipo de azotea y 0.765 es el coeficiente de escurrimiento correspondiente a una superficie de concreto (Volpi-León *et al.*, 2024). Con esta ecuación, se obtuvo un total de 1,552.20 m³ de agua recibida en azoteas, como lo indica la Tabla 7.

Tabla 7: Agua recibida

Tipo de azotea	Agua recibida m^3
Dúplex	13.52
Cuadrúplex	323.90
Multifamiliar 15	105.37
Multifamiliar 20	507.97
Multifamiliar 30	147.33
Comercio	210.70
Servicios	243.41
Agua total recibida	1552.20

4.2. Parámetros demográficos

El agua necesaria (AS) para poder alcanzar la dotación mínima requerida se calculó empleando la Ecuación 5 considerando los tipos de uso de suelo: habitacional, comercial y de servicios, como se presenta en la Tabla 8.

$$AS = asu_i * nus_i \quad (5)$$

Donde asu_i es el agua necesaria por uso de suelo y nus_i el número de usuarios por uso de suelo, obteniendo un total de $2,549.52 m^3$.

Tabla 8: Agua necesaria

Uso de suelo	m^3
Habitacional	2384.50
Comercial	6.24
Servicios	158.78
Agua total necesaria	2549.52

Para determinar el agua total disponible (AD), primero se calculó agua total disponible por suministro real en los diferentes usos de suelo (adu_i). Para este cálculo se empleó la Ecuación 6.

$$adu_i = sus_i * nus_i * pf \quad (6)$$

Donde sus_i es el suministro de agua por uso de suelo, nus_i el número de usuarios y pf lo correspondiente a pérdidas por fuga. Obteniendo un total de $481.312 m^3$ de agua disponible solo por suministro, ver Tabla 11.

Tabla 9: Agua disponible por suministro

Uso de suelo	m^3
Habitacional	400.59
Comercial	1.33
Servicios	79.39
Agua total disponible solo por suministro	481.32

Una vez calculada la cantidad de agua de lluvia recibida en las azoteas y el total del agua disponible por suministro, se pudo conocer el agua total disponible (AD) empleando la Ecuación 7.

$$AD = \sum_{i=1}^m az_i * sus_i \quad (7)$$

Donde az_i es el resultado del volumen de agua en azoteas y sus_i el suministro de agua real por uso de suelo. La i toma valores de 1 a m , donde m son los diferentes tipos de uso de suelo. Obteniendo un total de $2033.51 m^3$ de agua disponible considerando azoteas y suministro real.

4.3. Indicadores

Una vez que han sido aplicados los parámetros urbanos, hidrológicos y demográficos, se diseñaron indicadores para evaluar la gestión actual de agua de lluvia en el fraccionamiento.

4.3.1. Indicador de agua infiltrada

Del total de agua de lluvia recibida en el área del fraccionamiento, el 18.2 % se infiltra en el subsuelo. Este porcentaje se traduce en un indicador de agua infiltrada de 0.1826, como resultado de la Ecuación 8.

$$AI = \frac{\sum(AB)}{AR} \quad (8)$$

Donde AB es el agua absorbida por tipo de suelo en m^3 y AR el agua recibida en toda la superficie del fraccionamiento.

4.3.2. Indicador de agua disponible para autoconsumo

El cálculo de este indicador mostró que el 13.8 % del agua de lluvia recibida en la superficie del fraccionamiento puede ser utilizada para el consumo. Dato obtenido mediante la Ecuación 9.

$$AD = \frac{\sum(AZ)}{AR} \quad (9)$$

Donde AZ es el agua captada en azoteas y AR el agua recibida en toda la superficie del fraccionamiento.

4.3.3. Indicador de agua de escorrentía

La simulación también mostró que un 60.1 % del agua total recibida se escurre, lo que indica que una proporción significativa del agua sigue siendo desaprovechada. Este resultado corresponde a un indicador de agua de escorrentía de 0.60989, calculado con la Ecuación 10.

$$AE = \frac{\sum(AN)}{AR} \quad (10)$$

Donde AN es el agua no aprovechada por tipo de superficie en m^3 y AR el agua recibida en toda la superficie del fraccionamiento.

4.3.4. Indicador de agua suficiente

El análisis también mostró que la cantidad de agua suficiente alcanzó un 79.76 % del total de agua recibida, lo que implica que el suministro actual es insuficiente para satisfacer la demanda. Este valor corresponde a un indicador de agua suficiente de 0.79761, calculado mediante la Ecuación 11.

$$AF = \frac{\sum(AD)}{AS} \quad (11)$$

Donde AD es el agua disponible considerando agua de azoteas y suministro real en m^3 y AS el agua necesaria considerando todos los tipos de uso de superficie en m^3 .

4.3.5. Indicador de agua necesaria por tipo de azotea

En el análisis del agua necesaria para el consumo por tipo de uso de suelo, se identificó que en el uso habitacional, el indicador de agua necesaria fue de 0.336, lo que representa aproximadamente un tercio de la cantidad requerida para satisfacer las necesidades de este tipo de suelo.

4.4. Análisis de los escenarios propuestos

A continuación, se presenta el análisis de los escenarios evaluados en este estudio. En el primer escenario se describe la situación actual de la zona, donde se determinó que el suministro de agua ocurre por tandeo. Esta es una estrategia utilizada en zonas de escasez hídrica para racionar el agua a la población. Debido a esto, el suministro de agua no alcanza lo mínimo establecido en la normativa estatal, donde debe garantizarse una dotación diaria por habitante de 0.125 m^3 . El escenario dos implica la recolección de agua pluvial en las azoteas de las diferentes unidades habitacionales, y el escenario tres considera la recolección de agua de lluvia en viviendas, áreas comerciales y de servicio.

4.4.1. Escenario Real

En el escenario actual, el volumen de agua requerido para cubrir el consumo, según el tipo de uso de suelo y la cantidad de usuarios, resulta insuficiente en comparación con el suministro público disponible. Las áreas habitacionales son las más afectadas, pues reciben apenas una tercera parte del volumen esperado. De manera similar, la zona comercial presenta un déficit considerable, mientras que únicamente las áreas destinadas a servicios alcanzan la dotación necesaria, ver Tabla 10.

Azotea	AS m^3	SR m^3	AF
	(suministro público)		
Dúplex	13.5	4.54	0.336
Cuádruplex	325.8	109.47	0.336
Multi 15	263.25	88.45	0.336
Multi 20	1404	471.74	0.336
Multi 30	378	127	0.336
Comercio	6.24	2.65	0.425
Servicios	150.08	150.08	1

4.4.2. Escenario empleando SCALL para uso habitacional

En el segundo escenario se estimó el volumen de agua pluvial que puede captarse a través de las azoteas de las viviendas. Al incorporarse este volumen al suministro real, la disponibilidad de agua se incrementó de manera significativa. En ciertos casos, como en las viviendas tipo dúplex, la captación superó la demanda en un 34 %, generando un excedente respecto a las necesidades de sus habitantes. En contraste, en los conjuntos multifamiliares de 15 viviendas, aunque se registró un incremento del 74 % en relación con el suministro real, este volumen aún resultó insuficiente para cubrir la demanda total, observado en la Tabla 11.

Tabla 11: Escenario con cosecha de lluvia en azoteas habitacionales

Tipo de azotea	AS m^3	SR m^3	AZ m^3	AD m^3	AF
Dúplex	13.5	4.54	13.52	18.06	1.34
Cuádruplex	325.8	109.47	323.90	433.37	1.33
Multi 15	263.25	88.45	105.3	193.83	0.74
Multi 20	1,404	471.74	507.97	979.71	0.70
Multi 30	378	127	147.33	274.33	0.73

4.4.3. Escenario empleando SCALL para los usos de suelo

En el tercer escenario se consideró la captación de agua pluvial en las azoteas de viviendas, áreas comerciales y de servicios. Al combinarse con el suministro real, la disponibilidad total de agua superó la demanda requerida. Este excedente abre la posibilidad de ser redistribuido hacia los conjuntos habitacionales que no logran cubrir sus necesidades hídricas, mostrado en la Tabla 12.

Tabla 12: Escenario con cosecha de lluvia en azoteas de viviendas, comercios y servicios

Tipo de azotea	AS m^3	SR m^3	AZ m^3	AD m^3	AF
Dúplex	13.50	4.54	13.52	18.06	1.34
Cuádruplex	325.80	109.47	323.90	433.37	1.33
Multi 15	263.25	88.45	105.30	193.83	0.74
Multi 20	1404	471.74	507.97	979.71	0.70
Multi 30	378	127	147.33	274.33	0.73
Comercio	6.24	2.65	210.70	213.35	34.19
Servicios	150.08	150.08	243.41	393.49	2.62

4.5. Discusión

El análisis realizado mediante indicadores aporta evidencia sobre el potencial de la cosecha de lluvia (SCALL) en zonas urbanas semiáridas. Los indicadores de agua infiltrada, agua disponible, agua de escorrentía y suficiencia hídrica muestran de manera cuantificable la magnitud de los aprovechamientos y pérdidas hídricas en la zona de estudio. El primer escenario reflejó que apenas 18 % de la lluvia se infiltra, mientras que más del 60 % se pierde como escorrentía, lo que visibiliza un uso ineficiente de un recurso que podría contribuir a reducir la vulnerabilidad hídrica.

La implementación de SCALL en viviendas (segundo escenario) reveló un comportamiento contrastante según la tipología habitacional. En viviendas dúplex y cuádruplex se alcanzaron niveles de suficiencia hídrica superiores a 1, lo que indica excedentes aprovechables, mientras que en edificios multifamiliares la disponibilidad aumentó hasta un 74 % respecto al suministro real, aunque sin lograr cubrir la demanda total. Este hallazgo confirma que la eficiencia del sistema depende de la relación superficie de azotea por usuario, lo cual plantea un desafío para la adopción de la tecnología en densidades habitacionales elevadas (Abdulla y Al-Shareef, 2009).

El tercer escenario introdujo un cambio de estrategia al incluir techos de comercio y servicios. Estos espacios generaron excedentes significativos ($AF \approx 34$ en comercio; $AF \approx 2.6$ en servicios), abriendo la posibilidad de redistribuir el recurso hacia conjuntos habitacionales deficitarios. Esta perspectiva trasciende el enfoque tradicional de autoconsumo unitario y sugiere una lógica de micro-red hídrica urbana, donde los usos mixtos permiten equilibrar déficits y excedentes en un mismo espa-

cio habitacional como el de este estudio. La propuesta resulta coherente con experiencias internacionales de gestión descentralizada del agua, donde se plantea la integración de distintas tipologías urbanas en sistemas de captación conjunta (Esparza, 2014; Avelar Roblero *et al.*, 2019).

Entre las estrategias de adaptación derivadas de los resultados obtenidos destacan: (a) almacenamiento modular en techos con alta relación superficie/usuario; (b) redistribución intrabarral de excedentes desde comercios y servicios hacia viviendas multifamiliares; (c) incorporación de criterios de captación y almacenamiento en licencias de construcción; y (d) articulación de SCALL con otras tecnologías de bajo impacto, como jardines de lluvia y pavimentos permeables, para reducir tanto la escasez como las inundaciones urbanas.

5. Conclusiones

Este estudio demostró que el uso de indicadores urbanos e hidrológicos constituye una herramienta eficaz para evaluar de manera estandarizada el potencial de la cosecha de lluvia en entornos urbanos semiáridos, como Mineral de la Reforma, Hidalgo. Los resultados evidenciaron que la implementación de tecnologías de bajo impacto (TBI) de captación pluvial puede contribuir de forma significativa a mitigar la escasez hídrica que enfrenta la población local.

En particular, se observó que las viviendas tipo dúplex y cuádruplex logran alcanzar niveles de suficiencia hídrica superiores a la demanda mínima establecida durante eventos pluviales comunes de temporada, mientras que en los conjuntos multifamiliares el impacto es menor debido a la alta densidad habitacional. Asimismo, el análisis mostró que las áreas comerciales y de servicios generan volúmenes excedentes de agua, lo que resalta su papel estratégico para complementar el abastecimiento doméstico mediante esquemas de redistribución.

Si bien los hallazgos confirman la viabilidad técnica de la captación pluvial en el área de estudio, es importante señalar las limitaciones del análisis, basado en un solo evento de lluvia y en una sola tipología de TBI. Futuras investigaciones deberán ampliar el marco de referencia al análisis de periodos de precipitación más amplios, explorar la interacción con fenómenos asociados como inundaciones o drenaje pluvial, y contrastar la aplicabilidad de diferentes tecnologías en diversas tipologías urbanas y climáticas.

En suma, la aplicación de sistemas de captación de agua de lluvia representa una alternativa viable y sostenible para reforzar la resiliencia hídrica en contextos urbanos, siempre que se acompañe de estrategias de redistribución y de una planificación integral que considere las particularidades demográficas y urbanas de cada zona.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Área Académica de Ingeniería y Arquitectura para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

Abdulla, F. A. y Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3):195–207.

- Akkerman, P. (2020). The calabash cistern 5000 l in africa. *International Rain-water Catchment Systems Experiences*, 229.
- Anaya-Garduño, M., Pérez-Hernández, A., y Luque-Delgadillo, A. (2021). Sistemas de captación del agua de lluvia (scall) para diversos usos. *Agro-Divulgación*, 1(CERO).
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., y Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los retos del agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2):341–371.
- Avelar Roblero, J. U., Sánchez Bravo, J. R., Domínguez Acevedo, A., Lobato de La Cruz, C., y Mancilla Villa, O. R. (2019). Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. *Idesia (Arica)*, 37(1):53–59.
- Ávila, A. (2013). Ecotecnia para captación y reciclaje de aguas pluviales en casas de interés social en pachuca, hidalgo. *México DF*.
- Cantu Vela, N. C., Estrada Bouchot, A. E., Martínez García, S. E. R., y Olea Cohen, P. (2020). Problemáticas de la adopción socio-tecnológica en programas sociales: el caso de los sistemas de captación de agua de lluvia en la CDMX. *Ciudad de México : UAM, Unidad Cuajimalpa, División de Ciencias de la Comunicación y Diseño*.
- CONAGUA (2018). *Comisión Nacional del Agua: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado, Libro 4*. Último acceso: 09 de junio de 2025.
- CONAGUA (2024). *Comisión Nacional del Agua: Información Estadística Climatológica*. Último acceso: 09 de junio de 2025.
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89):193–219.
- Espíndola, J. A. G. (2017). La gestión sustentable del agua en la arquitectura y urbanismo. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (1):29–44.
- Gado, T. A. y El-Agha, D. E. (2020). Feasibility of rainwater harvesting for sustainable water management in urban areas of Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26):32304–32317.
- García de Miranda, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana.
- Garmendia, M., López de Armentia, T., Cubero, G., Pellejero, I., Solaberrieta, L., y Santos, F. (2021). Inserción curricular de enfoques y herramientas de la cooperación al desarrollo en la asignatura abastecimiento y saneamiento de aguas del grado en ingeniería civil. En *IN-RED 2021: VII Congreso de Innovación Educativa y Docencia en Red*, pp. 1193–1206. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Hdeib, R. y Aouad, M. (2023). Rainwater harvesting systems: An urban flood risk mitigation measure in arid areas. *Water Science and Engineering*, 16(3):219–225.
- Hugues, R. T. (2019). La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(2):125–139.
- Koncagul, E., Connor, R., y Abete, V. (2024). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2024: agua para la prosperidad y la paz; datos, cifras y planes de acción. Recuperado de <http://policycommons.net/artifacts/11770060/informe-mundial-de-las-naciones-unidas-sobre-el-desarrollo-de-los-recursos> [Último acceso: 06 de junio de 2025].
- López, J. S., González, R. C., y Herrera, J. V. (2016). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo. *Ingeniería*, 20(1):1–13.
- López-Hernández, N. A., Palacios-Vélez, O. L., Anaya-Garduño, M., Chávez-Morales, J., Rubiños-Panta, J. E., y García-Carrillo, M. (2017). Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(6):1433–1439.
- Morote, Á.-F. y Hernández, M. (2016). Urban sprawl and its effects on water demand: A case study of Alicante, Spain. *Land Use Policy*, 50:352–362.
- Ndour, N., Laval, E., Mbodj, A., Diène, M., Sarr, M., Langston Diagne, M., y Bernoux, M. (2020). État des lieux pour le processus d'élaboration du plan national d'adaptation pour le secteur de l'agriculture en Sénégal. Recuperado de: <https://openknowledge.fao.org/items/56cb89c7-9d45-4bea-9716-7aef82d989dc> [Último acceso: 09 de junio de 2025].
- Noori, A. R. y Singh, S. (2023). Rainfall assessment and water harvesting potential in an urban area for artificial groundwater recharge with land use and land cover approach. *Water Resources Management*, 37(13):5215–5234.
- SEDEMA (2020). *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, Manual para cosechar la lluvia*. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPA/manual> [Último acceso: 09 de junio de 2025].
- Solórzano-Villarreal, J. O., Gómez-Núñez, J., y Peñaranda-Orsorio, C. V. (2019). Metodología para estimar la relación de consumo y captación de agua lluvia en un edificio en la universidad autónoma metropolitana, unidad

- azcapotzalco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(6):178–196.
- Umukiza, E., Ntole, R., Chikavumbwa, S. R., Bwambale, E., Sibale, D., Jeremiah, Z., Apollonio, C., y Petroselli, A. (2023). Rainwater harvesting in arid and semi-arid lands of Africa: challenges and opportunities. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 22(2):41–52.
- Volpi-León, V., Seck-Tuoh-Mora, J. C., Bigurra-Alzati, C. A., Juárez-Sedano, A. D., y Lizárraga-Mendiola, L. (2024). Design of urban indicators to optimize the implementation of low-impact techniques in semi-arid cities. *Applied Sciences*, 15(1):294.