

Mecanismos de adaptación al cambio climático. Análisis de técnicas de cosecha de agua de lluvia

Mechanisms of Adaptation to Climate Change: Analysis of Rainwater Harvesting Techniques

Cindy Ortiz Escoto¹, Mitzy Isabel Turrubiates Contreras², Amanda Enriqueta Violante Gavira³ y Mauricio Aguilar Ramírez⁴

¹y²DICIS, Ingeniería Mecatrónica, ³y⁴DICIS, Ingeniería Mecánica.

c.ortizescoto@ugto.mx¹, mi.turrubiatescontreras@ugto.mx², amanda@ugto.mx³ y m.aguilarramirez@ugto.mx⁴

Resumen

La escasez de agua se ha convertido en un problema cada vez más grave en los últimos años. A nivel mundial, aproximadamente el 26% de la población carece de acceso a servicios de agua. En México, el 75% del territorio experimentó algún grado de sequía en 2024, lo que ha privado a muchos habitantes de agua adecuada para sus necesidades. Este escenario es consecuencia del cambio climático, ya que el aumento de las temperaturas ha alterado los patrones de precipitación y el ciclo hidrológico global. Para mitigar esta problemática y facilitar el acceso al agua, se han desarrollado técnicas de cosecha de agua de lluvia mediante Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). El objetivo de este artículo es investigar cuál es la técnica de cosecha de agua más conveniente para diferentes usuarios, justificando su elección y resaltando su importancia. El estudio se centró en el análisis de cuatro tipos de sistemas: captación en techos (A), cosechador portátil (B), atrapaniebla (C) y captación en suelos (D), utilizando seis criterios de diseño y operación: 1. Captación, 2. Conducción, 3. Desvío general, 4. Pretratamiento de filtración, 5. Almacenamiento, y 6. Filtración. Se aplicó el método Pugh, para definir el sistema óptimo. Los resultados sugieren que la técnica captación en techos (A) es la más completa. Sin embargo, se señala que, aunque esta técnica sea la más eficiente, no siempre es la mejor opción para todos los usuarios, ya que su conveniencia depende del entorno donde se desea instalar.

Palabras clave: cosecha de agua de lluvia, SCALL, sequía, escasez de agua, método Pugh.

Introducción

Contexto mundial

El notable aumento de la población mundial, junto con una demanda intensiva de agua, ha revelado que la disponibilidad de este recurso y la infraestructura en muchos países no son suficientes para satisfacer las necesidades de sus habitantes. Los sistemas de suministro de agua están siendo severamente desafiados por la creciente demanda, además, el cambio climático está exacerbando la escasez de agua. La alteración de los patrones de lluvia, junto con la disminución del agua almacenada en el suelo, la nieve y el hielo, está reduciendo la cantidad de agua accesible para la población. Estos cambios no solo afectan la disponibilidad de agua, sino que también tienen un impacto profundo en la estabilidad social y económica de las comunidades que dependen de estos recursos. Según la ONU, la situación está empeorando, lo que subraya la necesidad urgente de adoptar medidas más efectivas para gestionar y conservar los recursos hídricos a nivel global (ONU, 2022).

La disponibilidad de agua dulce en el planeta es muy limitada, pues, aunque se tiene un estimado de que existen cerca de 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua, únicamente el 2.5% de esta corresponde a agua dulce de la cual, tres cuartas partes se encuentran en glaciares y mantos de hielo, mientras que solo el 1% del agua dulce no congelada se encuentra de forma poco uniforme en ríos, arroyos y humedales (SEMARNAT, 2016). Esta distribución desigual significa que muchas regiones del mundo enfrentan una escasez crónica de agua, afectando la agricultura, la industria y sobre todo la vida cotidiana de millones de personas.

Observando estos datos, se puede entender por qué se ha convertido en un desafío lograr que el agua esté al alcance de toda la población. Para poner en perspectiva esta problemática, de acuerdo con lo dicho por UNESCO (2023), En el año 2020, el 26% de la población mundial no tenía acceso a servicios básicos de agua potable y cerca del 46% carecía de servicios de saneamiento adecuados. Más alarmante aún es la proyección de la misma institución que estima que para 2050, 2.4 mil millones de personas en zonas urbanas enfrentarán escasez de agua, lo que representará la mitad de la población urbana mundial.

Contexto local

En cuanto a México, el panorama no es más alentador que en el resto del mundo. Actualmente, el 75% del territorio nacional experimenta algún grado de sequía, de acuerdo con los datos proporcionados por el Monitor de Sequía de la CONAGUA (2024). Estos indicadores pueden observarse con mayor claridad en la Figura 1.

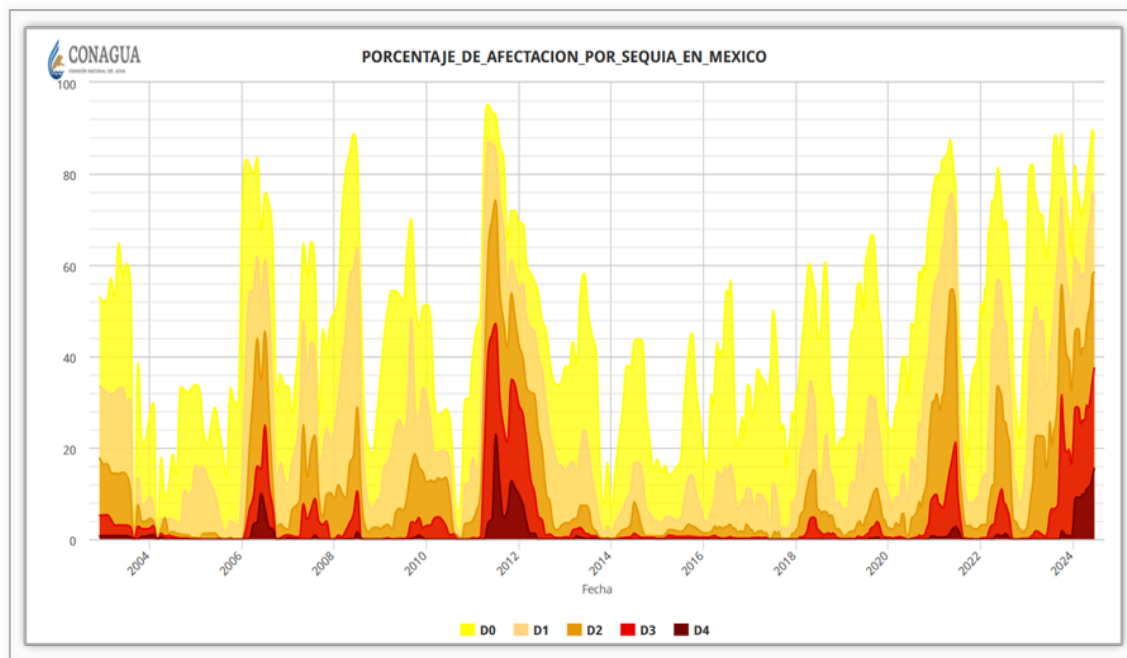


Figura 1. Porcentaje de afectación por sequía en México (CONAGUA, 2024).

Además, se ha reportado que más del 80% de los municipios en más de la mitad de México están experimentando algún nivel de sequía (Escudero-Santiago, 2024). Esta situación ha ocasionado que cerca de 10 millones de habitantes no dispongan de agua para sus actividades diarias. Además, no toda el agua que llega a las personas está en condiciones adecuadas para su uso (Tecnológico de Monterrey, 2022).

La falta de mantenimiento y la mala distribución de agua, tanto por parte del gobierno como de los ciudadanos, ha agravado aún más la situación. Esto subraya la necesidad urgente de mejorar la infraestructura hídrica y buscar alternativas más efectivas para la gestión y distribución del agua en el país.

Relación del cambio climático con la precipitación pluvial

El cambio climático tiene uno de sus impactos más significativos y observables en la dinámica del agua en el planeta. Actualmente, se pueden ver alteraciones en los patrones de lluvia, una reducción notable en las capas de hielo y glaciares, así como un aumento en el nivel del mar. Estos cambios traen consigo la salinización de las aguas subterráneas, el incremento en la frecuencia y severidad de las inundaciones y exacerbando las sequías (ONU, 2022).

La disponibilidad de agua dulce en la Tierra es ya de por sí muy limitada y en las últimas dos décadas ha disminuido a un ritmo de 1 centímetro por año. Este fenómeno se ve agravado por el aumento del nivel del mar, que tiene graves consecuencias para los recursos hídricos. La salinización de las aguas subterráneas reducirá la cantidad de agua disponible tanto para los seres humanos como para los ecosistemas cercanos a los mares. Además, el aumento del nivel del mar incrementará la frecuencia y severidad de las inundaciones, lo que empeorará la contaminación del agua al arrastrar patógenos, pesticidas y otros contaminantes. Todo esto contribuye a la creciente dificultad para garantizar una disponibilidad de agua segura para el consumo de las personas (ONU, 2022).

México enfrenta de manera aguda esta problemática. Para 2030, se estima una disminución en la disponibilidad natural de agua debido al aumento de la temperatura y la evapotranspiración, lo que equivaldrá a una reducción anual del 10% en comparación con la disponibilidad del año 2000. Esta disminución significará un aumento en la demanda del sector agrícola y, por lo tanto, se deberán buscar alternativas para el riego y el abastecimiento general de la población (González-Villarreal et al. 2022).

Soluciones innovadoras y sostenibles para la crisis hídrica: Cosecha de agua de lluvia

Ante el panorama crítico de la crisis hídrica, es imperativo buscar soluciones innovadoras y sostenibles para enfrentar este desafío global. Una de las estrategias más prometedoras es la cosecha de agua de lluvia, un método que consiste en recolectar y almacenar el agua de lluvia para su uso posterior. Esta práctica es de bajo costo y sencilla de implementar, pero proporciona grandes beneficios. De acuerdo con Consejo, López, y Hernández (2018), este tipo de sistemas puede ser usado como fuente principal de abastecimiento durante el periodo de lluvias o como complemento a otras fuentes de agua, dependiendo de la intensidad de la lluvia y la duración de la temporada.

La cosecha de agua de lluvia se lleva a cabo a través de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia, también conocidos como "SCALL". Estas tecnologías desvían el agua de lluvia mediante canales hacia un espacio habilitado para su almacenamiento, ya sea cisternas, tinacos o tanques especialmente preparados para este fin. Antes de su almacenamiento, el agua pasa por un proceso de filtrado (CONAGUA, 2023). Cabe destacar que el agua captada no puede ser bebida ni ser utilizada en actividades de contacto directo como el aseo personal o su contacto con alimentos.

Una de las ventajas más significativas de los SCALL es que el agua de lluvia, en general, es de excelente calidad, lo que la convierte en una fuente segura y confiable de abastecimiento. Además, casi cualquier superficie puede ser adecuada para la instalación de un sistema SCALL, con la excepción de materiales como el asbesto. Esto permite su uso en una variedad de lugares, incluyendo casas, escuelas, clínicas e incluso industrias, lo que reduce la necesidad de acarrear o dirigir el agua a través de grandes distancias y disminuye las pérdidas en estos procesos (Paredes y Munguía, 2017).

Beneficios y limitaciones de los sistemas SCALL

La cosecha de agua de lluvia ofrece numerosos beneficios. No solo ayuda a mitigar los efectos de la escasez de agua, sino que también promueve la autosuficiencia y reduce la presión sobre las fuentes tradicionales de agua. Además, la implementación de estos sistemas contribuye a la resiliencia de las comunidades frente a los impactos del cambio climático, proporcionando una solución práctica y sostenible para la gestión del agua. En la Tabla 1 se presentan algunos beneficios ambientales, económicos y sociales asociados a la adopción de un sistema SCALL, de acuerdo con SEDEMA (2020).

Sin embargo, la instalación de estos sistemas presenta ciertas limitaciones que deben evaluarse cuidadosamente para determinar su viabilidad en una zona específica. Según SEDEMA (2020), la cantidad de agua recolectada está directamente relacionada con la cantidad de lluvia que cae en cada región.

Tabla 1. Beneficios y limitaciones.

Beneficios ambientales	Beneficios económicos	Beneficios sociales y de salud
Incrementa la disponibilidad de agua localmente, evitando la necesidad de transportarla por largas distancias, por lo que se reducen los requerimientos de bombas, pipas y otros métodos de distribución.	El principal costo de esta tecnología se encuentra en la instalación inicial del sistema SCALL.	Mejora el acceso y la calidad del agua, lo que tienen un impacto positivo en la calidad de vida, higiene y salud de las personas.
Reducen la dependencia de la extracción de agua de los acuíferos y otras fuentes naturales.	El retorno de inversión puede variar según el costo del sistema y del suministro de agua.	Es capaz de proporcionar agua de alta calidad si el sistema SCALL está bien diseñado, instalado y mantenido.
Disminuye el volumen de agua de lluvia que fluye hacia los desagües y calles durante las tormentas, reduciendo la presión sobre la infraestructura hidráulica y minimizando los riesgos de inundaciones.	Los beneficios son mayores en zonas donde el agua es cara, el techo es grande o el sistema se integra desde el comienzo de una nueva construcción.	La captación de lluvia promueve una cultura de conservación y uso responsable del agua.

Fuente. Adaptado de (SEDEMA, 2020)

Esto implica que, en áreas con una precipitación media anual inferior a 400 mm, la técnica de recolección de agua no producirá resultados significativos. Además, en muchas partes del país, la lluvia es estacional, con meses lluviosos y otros secos. Por lo tanto, el sistema SCALL solo podría proporcionar agua durante la temporada de lluvias, limitando su utilidad como fuente continua de abastecimiento.

Para garantizar la mayor efectividad posible al instalar un sistema SCALL, SEDEMA (2020) sugiere considerar los siguientes puntos:

1. Identificación de la localidad: Determinar la localización geográfica e identificarla según los datos del INEGI.
2. Altura de precipitación: Esta información puede obtenerse mediante:
 - a. Normales climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional.
 - b. Métodos de Isoyetas, Polígonos de Thiessen o el método aritmético.
3. Número de habitantes: Esta cifra puede obtenerse a partir de un diagnóstico censal por el INEGI.
4. Dotación: La OMS recomienda entre 50 y 100 litros por habitante por día, aunque estos valores no son estrictamente obligatorios.
5. Área de captación: Se refiere a la zona que recogerá el agua de lluvia para su posterior conducción.
6. Coeficiente de escurrimiento: Se refiere al tipo de material utilizado en la techumbre de la vivienda, que afecta la eficiencia de la recolección de agua.

Aplicaciones prácticas y resultados de sistemas SCALL

En Ciudad de México, desde 2017 se han venido adaptando viviendas, edificios públicos e inclusive centros deportivos. La superficie de captación, los usos que se le dieron, así como el volumen de agua aprovechable que se logró captar se encuentran reportados en la Tabla 2.

Por otra parte, el proyecto "Isla Urbana", una iniciativa fundada en 2009 con el objetivo de fomentar el aprovechamiento del agua de lluvia para abastecer a las comunidades urbanas mediante sistemas SCALL, ha beneficiado a miles de personas al instalar más de 20,000 sistemas de captación, logrando cosechar alrededor de 815 millones de litros de agua. Este impresionante logro ha permitido a numerosas familias acceder a un recurso vital de manera sostenible y eficiente, mejorando significativamente su calidad de vida. Además, "Isla Urbana" ha implementado el programa "Escuelas de Lluvia", que busca promover la educación sobre la sustentabilidad hídrica entre las comunidades escolares, inculcando valores y prácticas que contribuyen a la conservación del agua desde una edad temprana (Tecnológico de Monterrey, 2022).

Es fundamental dar una mayor difusión a este tipo de técnicas y programas para que más comunidades puedan beneficiarse y contribuir a la sostenibilidad del recurso hídrico. La difusión y el conocimiento sobre estos sistemas de captación de agua de lluvia no solo ayudarán a mitigar los problemas de escasez de agua, sino que también fomentarán una mayor conciencia ambiental y la adopción de prácticas sostenibles en más regiones.

Tabla 2. Sistemas SCALL implementados en la Ciudad de México.

Contexto de aplicación de SCALL	Generalidades	Superficie captación (m ²)	Volumen de agua aprovechable (litros / año)	Uso del agua captada
Vivienda.	Ese sistema de captación fue uno de los 10,000 instalados en el año 2019 por el Gobierno de la Ciudad de México, en el marco del programa de captación de lluvia de la secretaria del Medio Ambiente.	80	40,152	Uso general en el hogar y usos potables (riego, limpieza, lavado de ropa, sanitarios, lavamanos, cocina).
Edificio público.	Se instaló en un edificio público, donde los usos del agua se limitan a limpieza, sanitarios y lavamanos; el agua se puede beber en el primer punto de uso, ubicado a un costado del SCALL.	200	244,910	Limpieza, lavamanos, sanitario, bebida.
Centros deportivos 2017.	Pista de Remo "Virgilio Uribe" Cuernavaca.	1500	1,194	Limpieza de alberca, superficies, sanitarios, lavabos, regaderas.
	Ciudad deportiva "Magdalena Mixhuca" Iztacalco.	1600	1,245	
Edificio de oficinas.	Centro social y deportivo "Rosario Iglesias Rocha" Coyoacán.	400	315 m ²	Limpieza de vehículos y áreas comunes, aire acondicionado, entre otros.
	Sistema instalado como condicionante establecida por el sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) para nuevas edificaciones.	818	409,000	

Fuente. Adaptado de (SEDEMA, 2020)

Además, compartir los éxitos y aprendizajes de "Isla Urbana" puede inspirar a otras iniciativas y gobiernos a implementar soluciones similares, amplificando el impacto positivo en el medio ambiente y en las comunidades urbanas alrededor del mundo.

Por ello, se lleva a cabo este estudio con el objetivo de presentar y comparar cuatro técnicas diferentes para la captación de agua de lluvia. Este análisis incluye una descripción detallada de sus características, ventajas, desventajas y aplicaciones, permitiendo al lector conocer y seleccionar el sistema que mejor se adapte a sus necesidades.

De acuerdo con SEDEMA (2020), un sistema SCALL puede dividirse en seis criterios de diseño y operación, dichos criterios se describen de la siguiente forma:

1. Captación:

El sistema comienza en la superficie, generalmente un techo o cubierta, que recibe el agua de lluvia destinada a ser almacenada. La capacidad de captación depende del tamaño de la superficie y la cantidad de lluvia recibida en la zona. Es crucial garantizar la calidad del material y la limpieza de las partes que componen esta etapa, ya que afectan directamente la calidad del agua cosechada. Por ello, se deben evitar materiales que puedan desprender toxinas o se descompongan fácilmente.

2. Conducción:

En esta etapa, el agua se transporta desde la superficie de captación hacia las siguientes fases de pretratamiento y almacenamiento. Este proceso incluye canaletas, tubos y otros elementos que dirigen el agua hacia los demás componentes del SCALL.

3. Desvío general:

Este mecanismo está diseñado para desviar el agua directamente hacia el drenaje en situaciones donde no debe captarse. Esto incluye casos como cuando la superficie de captación está muy sucia, durante los primeros aguaceros de la temporada que arrastran más contaminantes, o durante un aguacero en una contingencia ambiental, entre otros.

4. Pretratamiento de filtración:

Para evitar que ingresen hojas, ramas o algún otro elemento que contamine o bloquee el almacenamiento, se añade esta etapa de pretratamiento. Es recomendable utilizar mallas de plástico o acero, ya que son fáciles de limpiar. Sin embargo, también se puede usar un filtro de arena y grava para filtrar el agua antes de su almacenamiento.

5. Almacenamiento:

La etapa de almacenamiento es crucial en el sistema SCALL, ya que implica la conservación del agua captada en condiciones óptimas hasta su uso. Los depósitos deben estar diseñados para prevenir la contaminación y minimizar la pérdida de agua por evaporación. Es importante que los tanques de almacenamiento sean de materiales duraderos y no reactivos, como plástico de alta densidad o concreto tratado. Además, deben contar con tapas herméticas para evitar la entrada de polvo, insectos o cualquier otra fuente de contaminación externa. Algunos sistemas de almacenamiento también incluyen sistemas de monitoreo para controlar los niveles de agua y detectar posibles contaminaciones.

6. Tratamiento:

Aunque el agua de lluvia suele tener buena calidad, puede contener bacterias, microbios y otros microorganismos dañinos para los usuarios, por lo que esta etapa es vital en el sistema SCALL. La desinfección o tratamiento pueden realizarse dentro del depósito de almacenamiento o en algún punto intermedio del sistema. Los métodos más utilizados son el cloro, ozono, plata coloidal y luz ultravioleta. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del método adecuado depende de las necesidades específicas y las condiciones del lugar donde se implementa el sistema. agua.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de técnica de captación junto con los nombres de cada criterio.

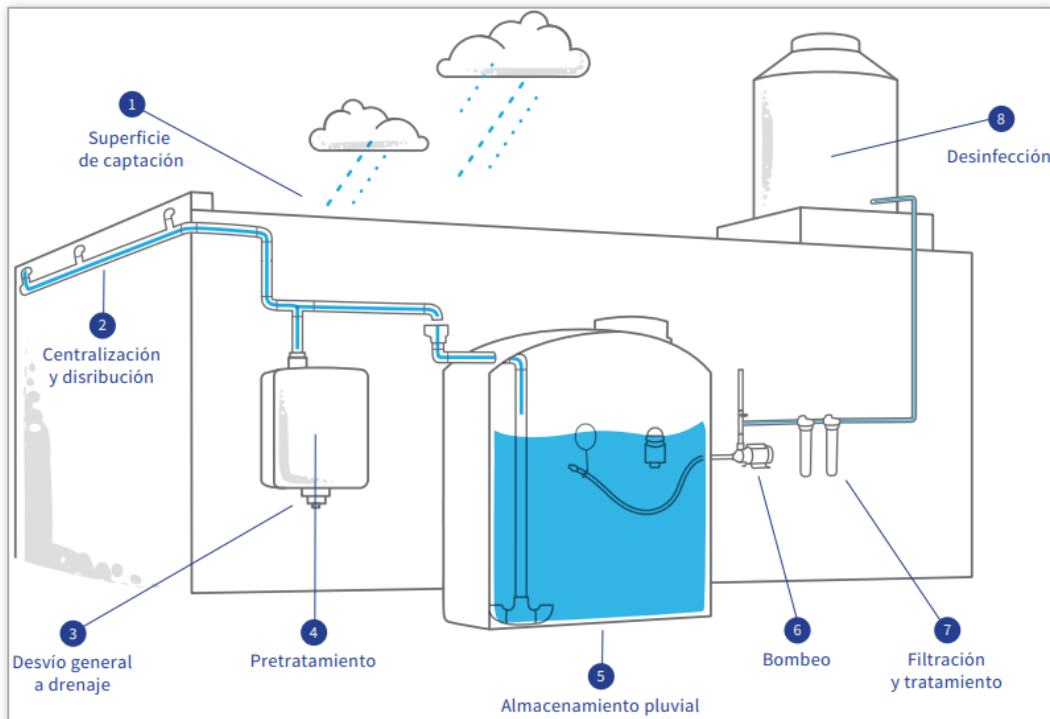


Figura 2. Etapas de un sistema SCALL (SEDEMA, 2020).

Tipos de cosechadores de agua de lluvias.

Existen múltiples modelos de mecanismos para la cosecha de agua de lluvias, sin embargo, los más comunes son los siguientes:

1. Cosecha de agua en techos:

Esta técnica se considera una tecnología de bajo costo y muy flexible. Puede proveer agua suficiente y de calidad durante la temporada de lluvias. Aunque generalmente se utiliza como fuente complementaria, puede servir como fuente principal de agua durante temporadas secas (Valdez, 2024). Este es uno de los mecanismos más utilizados, ya que puede implementarse en contextos urbanos y rurales tanto a nivel familiar como comunitario. Entre sus ventajas se encuentra que no requiere el uso de energía eléctrica, es de bajo costo porque se pueden utilizar estructuras ya existentes, y tiene una larga vida útil. Sin embargo, también presenta algunas desventajas, como la posible contaminación del agua por falta de mantenimiento en el sistema y la imposibilidad de uso durante periodos de sequía para cubrir las necesidades de agua (Valdez, 2024).

2. Cosecha de agua portátil

Se trata de sistemas compactos y fáciles de transportar, diseñados para recolectar, almacenar y, en algunos casos, filtrar agua de lluvia. Son ideales para su uso en áreas rurales, eventos al aire libre o situaciones de emergencia donde el acceso a agua potable puede ser limitado. Entre sus ventajas se encuentran su fácil mantenimiento y su costo relativamente bajo, ya que pueden ser elaborados con materiales sencillos y fáciles de instalar. Sin embargo, una de sus mayores desventajas es que los contenedores deben ser de tamaño reducido para mantener la portabilidad, lo que limita la cantidad de agua que pueden almacenar en comparación con otros sistemas.

3. Cosecha de agua atrapaniebla

Esta tecnología se basa en la recolección de agua de niebla mediante cortinas de malla Raschel, sostenidas por cables de acero y postes firmemente anclados al suelo. Es fundamental que el lugar tenga niebla densa y constante que se desplace a nivel de la superficie. El agua suspendida en la niebla se atrapa al entrar en contacto con la malla, formando gotas que descienden hacia una canaleta conectada a un tanque de almacenamiento mediante un tubo (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015). Este mecanismo ofrece muchas ventajas similares a la recolección de agua de lluvia desde techos, pero tiene una desventaja significativa: requiere un clima con mucha niebla para funcionar, lo que limita su adaptabilidad en comparación con los otros sistemas mencionados.

4. Cosecha de agua de lluvia en los suelos

La cosecha de aguas lluvias se refiere a la recolección y aprovechamiento del agua que escurre por la superficie tras lluvias intensas en regiones áridas y semiáridas. Esta técnica consiste en captar el agua que fluye desde áreas más grandes, como laderas y quebradas, y dirigirla hacia áreas más pequeñas donde se recoge. En estas zonas de colección, el agua se infiltra en el suelo, logrando una mayor saturación del perfil del suelo en comparación con la precipitación directa. Así, se diferencian el área de captación, donde se recoge el agua, y el área de colección, donde se acumula y utiliza el agua (Perret, Gacitúa, y Montenegro, 2011).

A continuación, se expone la Tabla 3, que resume las características esenciales de cada método en términos de superficie de captación, canaletas, desvío general, pretratamiento, almacenamiento y filtración. Esta comparativa tiene como objetivo facilitar la comprensión de las ventajas y limitaciones de cada método, permitiendo así una elección informada según las necesidades y condiciones específicas de cada contexto. de acuerdo con la SEDEMA (2020).

Tabla 3. Comparación de técnicas de cosecha de agua de lluvia.

Criterios	A	B	C	D
1. Superficie de captación.	Pendiente $\geq 2\%$. Material impermeable y liso. Libre de contaminantes. Superficies aceptables: Lámina de asbesto. Teja de barro sin sellar. Superficies ideales: Lámina plástica. Fibrocemento o similar. Tejas cerámicas. Loseta cerámica o concreto.	Pendiente $\geq 2\%$. Material impermeable y liso. Libre de contaminantes. Fácil de transportar. Forma de paraguas. Material: zinc o lona. Requiere mantenimiento.	Niebla densa y persistente. Atrapaniebla perpendicular a la niebla. Captación por medio de una o más cortinas de malla de propileno. Sostenido por cables y postes.	Pendiente de 3 a 15%. Uso de trincheras y surcos como colectores. Se utilizan barreras físicas (ej. sacos de tierra). Previenen la erosión y facilitan la infiltración.
2. Canaletas	Se deben considerar dos condiciones: Si no hay bajantes, diseñar para centralizar el escurrimiento. Si hay bajantes, centralizar el escurrimiento.	No requieren un sistema de conducción.	Materiales: bambú, madera, metal o PVC. Colocadas en la parte posterior.	Pendiente $\leq 1\%$ para evitar erosión. Materiales: bambú, madera, metal o PVC.
3. Desvío general.	Materiales: bambú, metal, madera o PVC Fijadas en el techo. Características: Tanque para agua no conducida al almacenamiento.	No cuentan con un desvío general.	Tanque para agua no conducida al almacenamiento.	No cuentan con un desvío general.
4. Pretratamiento.	Materiales: Unión Tee. Adaptadores. Válvulas. Tubo de PVC. Tanque.	Retención de basura evidente. Antes o después de la separación de primeras lluvias.	Filtro sobre el sistema de almacenamiento. Requiere revisión continua.	No cuentan con un pretratamiento.
5. Almacenamiento.	Base plana y nivelada. Recipiente con tapadera y desagüe. Considerar el peso lleno. Base de hormigón. Protegido del sol.	Desde cubeta hasta tanque. Fácil de transportar (≤ 200 litros)	Base plana y nivelada. Recipiente con tapadera y desagüe. Considerar el peso lleno. Base de hormigón. Protegido del sol.	Agua conducida a través de surcos a un tanque.
6. Filtración.	Varias etapas de tratamiento: Retención de sólidos. Retención de contaminantes disueltos. Desinfección.	No incluye sistema de filtración.	Varias etapas de tratamiento: Retención de sólidos. Retención de contaminantes disueltos. Desinfección.	No incluye sistema de filtración.

Fuente. Adaptado de (SEDEMA, 2020)

Al observar la Tabla anterior, se puede notar que no todos los mecanismos incluyen todas las etapas de un Sistema de Captación y Almacenamiento de Lluvia (SCALL). Sin embargo, esto no implica que sean inadecuados. Para realizar un análisis más completo y razonable, se utiliza una matriz de decisión.

Desarrollo

El desarrollo del presente estudio se centró en cuatro etapas como se puede ver en la Figura 3:

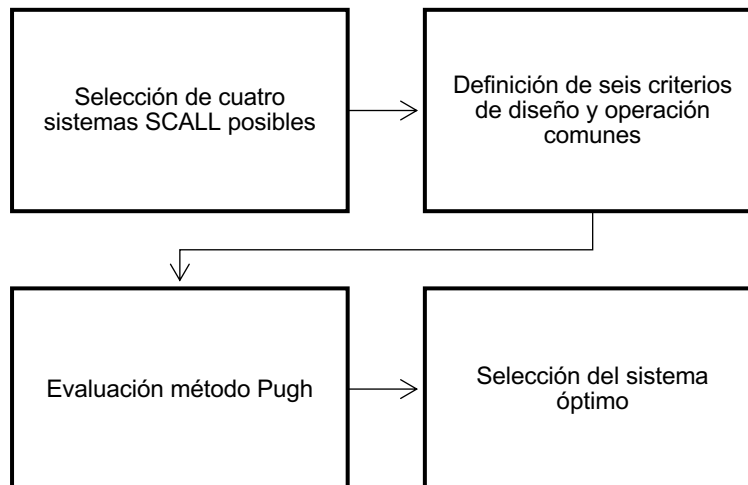


Figura 3. Etapas.

A continuación, se describen las etapas para el análisis y evaluación de cuatro sistemas SCALL comunes de acuerdo con la literatura:

1. Selección de cuatro sistemas SCALL posibles

Al comenzar con la investigación se observó que existe una gran variedad de sistemas SCALL, sin embargo, no todos se utilizan frecuentemente y otros solo varían en pequeñas modificaciones. Durante el análisis se llegó a la conclusión de que los cuatro SCALL más comunes son el de captación en techos (A), el cosechador portátil (B), atrapaniebla (C) y el de suelos (D). Esto debido a que es fácil adaptarlos casi a cualquier entorno lo que provoca que la mayoría de la población opte por utilizarlos debido a que su elaboración es más común y accesible. Esto condujo a la cuestión sobre cuál de los cuatro sistemas es más conveniente, el porque es más conveniente, cuáles son los criterios que cumple cada uno y que beneficios se obtiene de esto. De ahí se partió a la segunda etapa.

2. Definición de seis criterios de diseño y operación comunes

Se analizaron las especificaciones de los cuatro tipos de SCALL definidos anteriormente, considerando lo establecido por la SEDEMA (2020). Se definieron los siguientes seis criterios de diseño y operación para evaluar la mejor opción. Dichos criterios fueron: 1. Captación, 2. Conducción, 3. Desvío general, 4. Pretratamiento de filtración, 5. Almacenamiento y 6. Filtración. De los cuales se consideró el siguiente orden de mayor a menor ponderación: 1 y 5, 4, 2 y 6, 3.

3. Evaluación método Pugh.

Esta herramienta gráfica permite evaluar diversas opciones o alternativas en función de diferentes criterios. La valoración se presenta en una matriz donde cada casilla adquiere un valor numérico, lo que facilita una toma de decisiones razonable y justa. Esta herramienta es particularmente útil para valorar y resolver problemas multicriterio (Sanabria-Aguilar, 2006).

La evaluación de los cuatro sistemas con los seis criterios mencionados anteriormente se llevó a cabo aplicando el método Pugh, el cual consiste en la construcción de una matriz de ponderación en la que se incluyen las ponderaciones definidas (de 1 a 5 puntos) para cada sistema. Una vez que se asignaron estos puntajes para cada sistema. Posteriormente se sumaron los puntajes correspondientes a los seis criterios de las cuatro opciones de SCALL. Finalmente el mayor puntaje obtenido corresponde al sistema que de acuerdo con nuestro análisis es la mejor opción para cosechar el agua de lluvia.

Para construir esta matriz, se utiliza una escala de relevancia que va de 1 a 5 puntos, basada en la opinión de varios autores y expertos en investigaciones relacionadas. Después de asignar estos puntajes, cada método de SCALL se analiza según cada criterio, se asigna una puntuación correspondiente, y estas se multiplican. Finalmente, se suma el total de los valores obtenidos para obtener el puntaje final. En la Tabla 4 podemos observar los resultados de este análisis:

Tabla 4. Matriz de decisión.

Criterios	Nivel de relevancia	A	B	C	D
Superficie de captación	5	25	25	15	20
Canaletas	3	9	0	9	5
Desvío general	2	4	0	4	0
Pretratamiento	4	16	12	0	0
Almacenamiento	5	25	20	25	25
Filtración	3	9	0	0	0
Total		88	57	53	50

4. Selección del sistema optimo

El sistema denominado cosecha de agua en techos (A) obtuvo el puntaje más alto, destacándose como el método más completo. Sin embargo, es crucial entender que este puntaje no implica automáticamente que sea la mejor opción. La elección de un SCALL debe basarse en las necesidades específicas y las condiciones del lugar. La versatilidad del método de techos lo hace ampliamente utilizado, adaptándose a diversas situaciones. En segundo lugar, el método de cosecha de agua portátil también se adapta bien a diferentes contextos, aunque su puntaje refleja que no es tan completo debido a su necesidad de ser fácilmente transportable y removible. Por otro lado, los puntajes más bajos fueron para los métodos de cosecha atrapaniebla y de suelo, principalmente debido a los requisitos específicos que deben cumplir en términos de ubicación climática o características del terreno.

Conclusiones

En conclusión, el análisis detallado de los cuatro sistemas de cosecha de agua de lluvia y la aplicación de la matriz de adaptación revelan la importancia crítica de estas tecnologías en la mitigación de los efectos del cambio climático. Cada sistema ofrece ventajas únicas que pueden ser aprovechadas según las condiciones climáticas y geográficas específicas de cada región. La capacidad de recolectar y almacenar agua de lluvia no solo responde a la creciente escasez de recursos hídricos, sino que también promueve la autonomía comunitaria y reduce la presión sobre los sistemas hídricos naturales.

Además, la matriz de adaptación proporciona un marco claro para evaluar la viabilidad y la efectividad de cada sistema en diferentes contextos, permitiendo decisiones informadas y estratégicas en la implementación de soluciones de cosecha de agua de lluvia. Este enfoque integrador no solo mejora la capacidad de adaptación de las comunidades frente a la variabilidad climática, sino que también fomenta prácticas de gestión sostenible de recursos que son cruciales para el desarrollo sostenible a largo plazo, asimismo, la matriz de adaptación también facilita la identificación de las mejores prácticas y tecnologías más adecuadas para cada situación específica, con lo cual se logra optimizar el uso de los recursos disponibles.

En última instancia, la adopción generalizada de estas tecnologías no solo fortalecerá la resiliencia de las comunidades locales, sino que también contribuirá significativamente a la mitigación de los impactos del cambio climático globalmente. Es esencial promover políticas y programas que faciliten la implementación y el acceso equitativo a estas soluciones, asegurando así un futuro más seguro y sostenible para las generaciones venideras, sin embargo, para lograrlo se requiere un compromiso conjunto de gobiernos, organizaciones no gubernamentales y comunidades que trabajen de manera coordinada para integrar estas prácticas en el ecosistema de planeación tanto urbano como rural, es por esto que la colaboración y participación activa de todos los miembros de cada uno de estos nichos son fundamentales para alcanzar el éxito con estas iniciativas.

Bibliografía/Referencias

- Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. MDPI.
- Alvarado, R. (2015). Manual para la evaluación técnica-económica de: "Sistemas Fotovoltaicos Interconectados. Distrito Federal: giz.
- Baghdadi, I., Yaakoubi, A., Attari, K., Leemrani, Z., & Asselman, A. (2018). International Conference interdisciplinary in Engineering. 667-674.
- Banco Mundial. (2023, julio 17). Como la principal fuente multilateral de financiamiento para el sector hídrico en los países en desarrollo. Retrieved from <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- Bayer, B., Patrick, M., Heiko, T., & Adela, M. (2018). The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. ScienceDirect, 1-13.
- Chai, J.-H., Wong, B., & Juodkakis, S. (2020). Black-silicon-assisted photovoltaic cells for better conversion efficiencies: a review on recent research and development efforts. Materials Today Energy, 1-23.
- Collado, E. (2009). ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA, COMPETITIVIDAD Y EVALUCIÓN ECONÓMICA, COMPARATIVA Y MODELOS. 1-397.
- CONAGUA. (2018, julio 18). Estadísticas del agua en México. Retrieved from https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/recuadros/recuadro6_1.html
- CONAGUA. (2022a, junio 19). Sistema Nacional de Información del Agua. Portal de publicaciones. Retrieved from Estadísticas del agua en México: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- CONAGUA. (2022b, junio 17). Monitor de sequía en México. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- CONAGUA. (2023, Enero). Lineamientos Técnicos: Sistema de Captación de Agua de Lluvia a nivel Vivienda. Abastecimiento de agua por captación de agua de lluvia. Ciudad de México, Ciudad de México, México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2024, junio 20). Monitor de Sequía en México. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- CONAGUA. (2024, junio 19). Sistema Nacional de Información del Agua. Retrieved from Portal de publicaciones. NUMERAGUA 2022: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- Cummings, P. (2022, Marzo 22). Retrieved from esri Ecuador: <https://www.esri.ec/arcgisblog/cartografia-del-potencial-de-las-energias-renovables-con-la-ayuda-de-nasa-power/#:~:text=A%20través%20de%20su%20Proyecto,pueden%20cambiar%20con%20el%20tiempo>
- El Financiero. (2024, febrero 25). Diario Nacional. Retrieved from Mapa de la sequía en México: Estos son los estados más afectados por la escasez de agua: Mapa de la sequía en México: Estos son los estados más afectados por la escasez de agua
- Escudero Santiago, C. J. (2024, Marzo 20). Universidad Autónoma de Guadalajara. Retrieved from Día Mundial del Agua 2024, Más valiosa que nunca: <https://www.uag.mx/es/mediahub/dia-mundial-del-agua-2024-mas-valiosa-que-nunca/2024-03>
- FCEA. (2024, junio 24). Fondo para la comunicación y la educación ambiental. Retrieved from Agua virtual: <https://fcea.org.mx/>
- Fernández, L., & Cervantes, A. (2017). Proyecto de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira. 1-136.
- González-Villarreal, F., Vázquez-Herrera, E., Aguilar-Amilpa, E., & Arriaga-Medina, J. (2022, diciembre 12). Retrieved from Perspectivas del agua en México: https://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/Perspectivas_AguaenMexico2022.pdf
- HelioEsfera. (2017). Retrieved from HelioEsfera: <https://www.helioesfera.com/como-funciona-un-sistema-fotovoltaico-de-autoconsumo/>
- Hernández, R. (2017). ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL EDIFICIO 4 EN EL ITSLV. CIATEQ, 1-85.
- Huerta, L. (2024, mayo 20). Consecuencias de la sequía en México. Retrieved from https://unamglobal.unam.mx/global_revista/consecuencias-de-la-sequia-en-mexico/
- IBERO. (2024, ENERO 29). Escasez de agua adquirirá en los próximos años una relevancia aún mayor: especialista. Retrieved from <https://ibero.mx/prensa/escasez-de-agua-adquirira-en-los-proximos-anos-una-relevancia-aun-mayor-especialista>
- IMCO. (2023, febrero 7). Diagnóstico IMCO. Situación del agua en México. (IMCO, Editor) Retrieved from <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>

- IMCO. (2024, marzo 19). Retrieved from <https://imco.org.mx/la-mitad-de-la-poblacion-en-mexico-atravesia-una-sequia-severa-extrema-o-excepcional/#:~:text=Despu%C3%A9s%20del%20preocupante%2050%25%20de,6%25%20de%20a%20poblaci%C3%B3n%20nacional>.
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar. *Science Direct*, 1-15.
- Naciones Unidas. (2023, Mayo 13). Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Naciones Unidas. (2023 a, Mayo 13). Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Naciones Unidas. (2023 b, Mayo 12). Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- OMS. (2023, septiembre 2023). Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- ONU. (2022, Febrero 04). El agua: en el centro de la crisis climática. Retrieved from <https://www.un.org/es/climatechange/science/climateissues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20est%C3%A1%20acelerando,todo%20el%20ciclo%20del%20agua>.
- ONU-Agua. (2022, junio 13). Retrieved from Escasez de agua: <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>
- Paredes, G., & Munguía, S. (2017, Marzo). Manual para la construcción y mantenimiento de Cosechas de Aguas Lluvias. Tegucigalpa, Honduras: NDF.
- Perret, S., Gacitúa, S., & Montenegro, J. (2011). Técnicas de cosecha de aguas de lluvia y conservación de los suelos para la oasisificación del norte de Chile. Santiago de Chile: Instituto Forestal.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, I. U. (2015). Cosecha de agua de lluvia. Chile: Guía Práctica.
- REFORMA. (2024, abril 13). Se seca Lago de Pátzcuaro. Retrieved from <https://www.reforma.com/se-seca-lago-de-patzcuaro/ar2789268>
- Rouse, M. (2021, Agosto 24). Retrieved from technopedia: <https://www.techopedia.com/definition/14871/ambient-temperature-data-centers>
- Sanabria Aguilar, M. A. (2006). Toma de Decisiones con Criterios Múltiples: un resumen conceptual. México: UNED. Retrieved from <https://tomadedecisiones.net/matriz-de-decisiones/>
- SEDEMA. (2020, abril 28). Cosechar la lluvia. Manual para instalar un sistema de captación pluvial en tu vivienda. Ciudad de México, Ciudad de México, México: Gobierno de la Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2016, Diciembre 15). Informe del Medio Ambiente. Retrieved from <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- SENER. (2023, Mayo 09). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Retrieved from <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037-335360?idiom=es>
- Stanley, M. (2024, junio 18). Ocurrencia, disponibilidad y utilización de agua en la tierra. Retrieved from https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Ambiental/La_qu%C3%ADmica_verde_y_los_diez_mandamientos_de_la_sustentabilidad_%28Manahan%29/09%3A_Agua_-_la_Sustancia_Verde_Definitiva/9.02%3A_Ocurrencia%2C_disponibilidad_y_utilizaci%C3%B3n_del_agua_en_
- Syafaruddina, Engin, K., & Takashi, h. (2011). Fuzzy wavelet network identification of optimum operating point of non-crystalline silicon solar cells. *ELSEVIER*.
- Tecnológico de Monterrey. (2022, Agosto 1). Captación de agua de lluvia, una solución que nos cae del cielo. Retrieved from Tec. de Monterrey: <https://futurociudades.tec.mx/es/captacion-de-agua-de-lluvia>
- Thompson, M. (2007). Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems, *IET Renewable Power Generation* 1. *IEEE Xplore*.
- Valdez, P. E. (2024, junio 26). Tecnologías de abastecimiento de agua del sistema. Captación: Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox. Retrieved from Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-tecnologias-de-abastecimiento-de-agua-del-sistema/captacion-4/recolecci%C3%B3n-en-techos>