

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	30-09-2024	C
	Dependencia	Aprobado		Pág.
	DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Angie Fernanda Sánchez Abril y Luis Enrique Felizola Sánchez		
FACULTAD	Ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería civil		
DIRECTOR	Maira Alejandra Vergel Moncada		
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático, con un enfoque a ciudades más resilientes y sostenibles		
TITULO EN INGLES	Adapting drainage systems to climate change, with a focus on more resilient and sustainable cities		
RESUMEN (70 palabras)			
El cambio climático representa un gran desafío para la sostenibilidad urbana, afectando la infraestructura y la calidad de vida, especialmente en zonas vulnerables. Los sistemas de drenaje urbano evidencian fallas ante condiciones climáticas cambiantes. Esta monografía analiza la adaptación de dichos sistemas al cambio climático, enfocándose en experiencias de América, principalmente Colombia, México, Argentina y Estados Unidos, comparándolas con casos de otros continentes para fortalecer la planificación urbana resiliente.			
RESUMEN EN INGLES			
Climate change represents a major challenge for urban sustainability, affecting infrastructure and quality of life, especially in vulnerable areas. Urban drainage systems show deficiencies under changing climatic conditions. This monograph analyzes the adaptation of these systems to climate change, focusing on experiences in the Americas, mainly Colombia, Mexico, Argentina, and the United States comparing them with cases from other continents to strengthen resilient urban planning.			
PALABRAS CLAVES	Cambio climático, Sistemas de drenaje urbano, Adaptación, Sostenible, Infraestructura, Planificación urbana, América, Ingeniería.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Climate change, Urban drainage systems, Adaptation, Sustainable, Infrastructure, Urban planning, America, Engineering.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 153	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 30	CD-ROM: 1



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**Adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático, con un enfoque a
ciudades más resilientes y sostenibles**

Luis Enrique Felizola Sánchez

Angie Fernanda Sánchez Abril

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería civil

Esp. Maira Alejandra Vergel Moncada

10 de noviembre de 2025

Índice

Generalidades.....	5
Capítulo 1. Análisis bibliométrico y estado del arte	7
1.1 Análisis Bibliométrico.....	7
1.1.1. Metodología.....	7
1.2 Estado del arte	24
1.2.1 Investigaciones realizadas en América Latina.....	31
1.2.2 Estudios realizados en otras regiones	43
Capítulo 2. Impactos del cambio climático sobre el drenaje urbano y la infraestructura en América Latina.....	59
2.1 Cambio climático y su impacto en el ciclo hidrológico.....	59
2.2 Aumento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas	62
2.3 Cambios en la escorrentía superficial y saturación del drenaje urbano	71
2.4 Inundaciones urbanas: Factores relacionados con el cambio climático.....	78
2.5 Modelado y previsión del impacto del cambio climático en las redes de drenaje urbano.	82
Capítulo 3. Estrategias de adaptación de los sistemas de drenaje frente al cambio.....	89
3.1 Clasificación de estrategias de adaptación.....	91
3.1.1 Estrategias técnicas o de infraestructura gris	91
3.1.2 Estrategias sostenibles o basadas en la naturaleza.....	92

3.1.3 Enfoques integrados.....	92
3.1.4 Estrategias innovadoras con tecnología inteligente	92
3.1.5 Estrategias comunitarias y de gobernanza adaptativa.....	93
3.2 Estrategias técnico-estructurales o de infraestructura gris.....	93
3.3 Estrategias sostenibles basadas en la naturaleza (SBN)	97
3.4 Estrategias de enfoques integrados	98
3.4.1 Planificación del drenaje urbano con enfoque de cuenca	99
3.4.2 Conexión entre aguas lluvias, aguas residuales y escorrentía.....	99
3.4.3 Sistemas combinados vs. Separados	100
3.5 Estrategias innovadoras con tecnología inteligente	102
3.6 Estrategias de participación ciudadana y gobernanza adaptativa	105
3.7 Síntesis de estrategias integradas hacia sistemas de drenaje resilientes y sostenibles	107
Capítulo 4. Normativa y políticas de adaptación urbana al cambio climático.....	111
4.1 Marco normativo internacional.....	111
4.2 Contexto estadounidense	113
4.3 Contexto América Latina.....	114
4.4 Evidencia académica.....	117
Capítulo 5. Estudios de caso	119
5.1. Filadelfia (EE. UU.), Green City, Clean Waters.....	119

5.2. Copenhague (Dinamarca), Plan de Nubes Torrenciales (Cloudburst).....	121
5.3. Singapur, ABC Waters y el parque Bishan Ang Mo Kio	122
5.4. Wuhan (China), Ciudad Esponja	124
5.5. Ciudad de México, Cosecha de Lluvia	125
Conclusiones	128
Recomendaciones	130
Referencias.....	132

Adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático, con un enfoque a ciudades más resilientes y sostenibles

Generalidades

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales retos para la sostenibilidad urbana a nivel mundial. En específico, los entornos urbanos, cada vez están más expuestos a eventos meteorológicos, como lluvias intensas, olas de calor e inundaciones, donde sus frecuencias e intensidades han ido en aumento en las últimas décadas (Insua, et al., 2013). Este fenómeno, junto con el desarrollo creciente de la urbanización, está provocando impactos directos en la infraestructura urbana y en la calidad de vida de las poblaciones, especialmente en los sectores más vulnerables.

Entre los componentes más afectados se encuentran los sistemas de drenaje urbano, los cuales no siempre han sido diseñados para condiciones climáticas cambiantes; presentando fallas en la capacidad de evacuación, colapsos de redes, inundaciones recurrentes y daños estructurales en vías urbanas; estas son algunas de las manifestaciones más visibles del desajuste entre el diseño tradicional de las infraestructuras y las nuevas condiciones climáticas.

En este contexto, la presente monografía tiene como propósito compilar, organizar y analizar la producción científica más relevante sobre la adaptación de los sistemas de drenaje urbano al cambio climático, con énfasis en experiencias aplicables a ciudades de América. Más allá de una revisión técnica se busca ofrecer herramientas conceptuales y prácticas que apoyen

procesos de toma de decisiones, formulación de políticas públicas y diseño urbano resilientes. El enfoque geográfico estará centrado en América con énfasis en países como Colombia, México, Argentina y Estados Unidos por su alta vulnerabilidad y por el ritmo de urbanización que enfrentan. Además, se aportarán ejemplos de Asia, Europa y África, con la idea de contrastar enfoques y enriquecer la reflexión desde distintas experiencias.

La monografía se estructura en seis capítulos temáticos, según se presenta en la figura 1. En ellos se desarrollan progresivamente el análisis bibliométrico, los impactos del cambio climático en los drenajes urbanos, las estrategias y normativas de adaptación, estudios de caso y recomendaciones para acciones futuras.

Figura 1

Estructura de la monografía.



Nota. Elaboración propia. En base al contenido de la monografía, se plasma mediante un gráfico la secuencia y la estructura que esta tendrá

Capítulo 1. Análisis bibliométrico y estado del arte

1.1 Análisis Bibliométrico

1.1.1. Metodología

Para el análisis bibliométrico, se realizó una búsqueda en la base de datos Scopus. La ecuación de búsqueda avanzada empleada incluyó términos como: “*Adaptation of and water and drainage and systems*” y “*Climate and change*”.

La consulta se delimitó temporalmente al periodo comprendido entre 2010-2024. Aunque las recomendaciones bibliométricas suelen sugerir un lapso máximo de cinco años, para este estudio se optó por un margen temporal más amplio con el fin de obtener publicaciones relevantes dentro de este rango de tiempo. Esta decisión se fundamenta en la creciente frecuencia de eventos extremos asociados al cambio climático y el notable avance en las investigaciones científicas relacionadas con la adaptación de sistemas hídricos y de drenaje en la última década.

Una vez finalizada la búsqueda, se procedió a descargar un archivo en formato BibTex, para poder procesar toda la información y hacer el respectivo análisis cuantitativo. Como resultado del análisis realizado mediante el software Bibliometrix, se obtuvo un conjunto de 255 documentos, los cuales se destacan principalmente artículos científicos y capítulos de libros. Estos resultados se pueden evidenciar con mayor detalle en la Figura 2.

Figura 2*Tipos de documentos*

Nota. Elaboración propia. Los datos obtenidos de Bibliometrix, se organizaron y procesaron en Excel para así crear este gráfico, con el fin de ilustrar los tipos de documentos encontrados durante el análisis.

Dicho estudio bibliométrico se realizó con el software Bibliometrix, el cual es una herramienta conocida por ser competente a la hora de investigar, analizar y representar de manera visual las grandes cantidades de información científica que se hayan seleccionado. Con la ayuda de esta herramienta, se pudo observar que hay un interés académico en la adaptación de los sistemas de drenaje frente al cambio climático y que este tema va en crecimiento.

Además, Bibliometrix proporcionó los autores, países y revistas que han tenido mayor relevancia e impacto en este tema, así como también permitió determinar las diversas colaboraciones entre los investigadores, descubriendo las citas más destacadas. Toda esta

información fue básica para entender las perspectivas en la comunidad científica, y también para adoptar un principio sólido a la hora de desarrollar el estudio con un enfoque más acertado.

Respecto a las investigaciones más notables se pueden destacar la colaboración de 982 autores y de 167 fuentes académicas. Otro dato relevante es que 26 artículos fueron desarrollados por un solo autor, reflejando también el empeño individual por este contenido.

A continuación, en la figura 3 se puede observar un crecimiento persistente en la producción científica por este tema, contando con una tasa promedio anual del 15,29 %. Demostrando una vez más que este tema ha venido en aumento cada vez, por el gran impacto que esto refleja en la calidad de vida de la comunidad.

Figura 3

Caracterización de los documentos analizados por el software Bibliometrix



Nota. Datos obtenidos por medio del Software Bibliometrix.

En los últimos cinco años ha habido un notable aumento en la cantidad de investigaciones relacionadas con la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático. Una evidencia de

esto es que en el año 2022 se realizaron 33 investigaciones, y en el 2023 se realizaron 28 estudios consolidados. Hasta la actualidad del presente año 2025, se han identificado 5 investigaciones; este incremento refleja la creciente relevancia que tiene este asunto en la comunidad científica, resaltando la gran necesidad de establecer estrategias que sean efectivas para poder afrontar los fenómenos naturales y cualquier otro desafío que afecte a la comunidad.

En la figura 4, se encuentra una gráfica con el crecimiento que han tenido las investigaciones en cada año, para poder examinar claramente el interés que hay hacia este estudio.

Figura 4

Crecimiento de las investigaciones por año

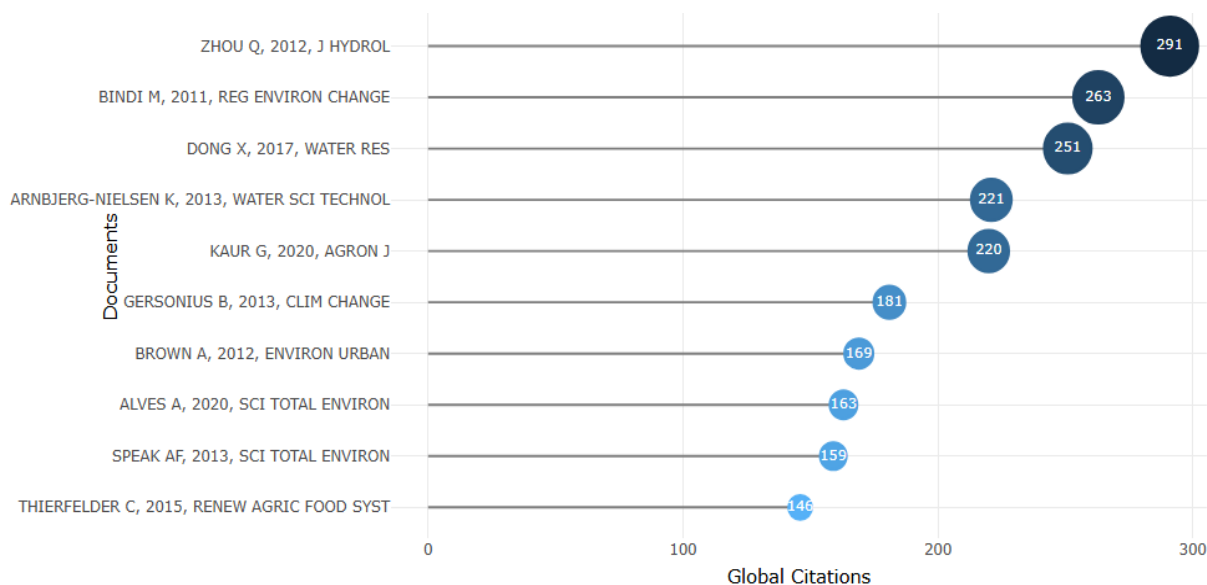


Nota. Elaboración propia, la información proporcionada por bibliometrix fue procesada y utilizada para crear este gráfico en Excel, con el fin de visualizar de manera clara el crecimiento progresivo que han experimentado las investigaciones a lo largo del tiempo.

Como se observa en la Figura 5, los cinco autores más influyentes en la adaptación de sistemas de drenaje al cambio climático son Zhou Q. (291 citas), Bindi M. (263 citas), Dong X. (251 citas), Arnbjerg-Nielsen K. (221 citas) y Kaur G. (220 citas).

Entre sus más importantes contribuciones se encuentra el artículo titulado “*Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits*”. Este documento recalca la urgente necesidad de adaptar los sistemas de drenaje en las ciudades para optimizar su eficacia frente a las lluvias intensas, las cuales están siendo más frecuentes debido al cambio climático. Los autores destacan no solo las limitaciones de la infraestructura existente, sino que también plantean un marco de evaluación de riesgos para inundaciones pluviales. Teniendo en cuenta la parte urbana, la exposición y la vulnerabilidad por esta problemática, es de vital importancia contar con herramientas que faciliten explorar y que prioricen las diferentes alternativas de adaptación.

En la figura 5 se puede observar que la posición de los autores más citados no evidencia solamente el interés por investigar de algunos autores, sino que también demuestra que se ha despertado en la comunidad científica una inclinación por la modificación de los sistemas de drenaje con respecto al cambio climático. Este acontecimiento es la prueba de que se ha vuelto una preocupación colectiva y por ende se ha visto un aumento progresivo en el número de publicaciones anuales, principalmente con relación a la planificación de ciudades sostenibles y menos vulnerables a eventos climáticos extremos.

Figura 5*Autores más relevantes*

Nota. Figura generada con el Software Bibliometrix.

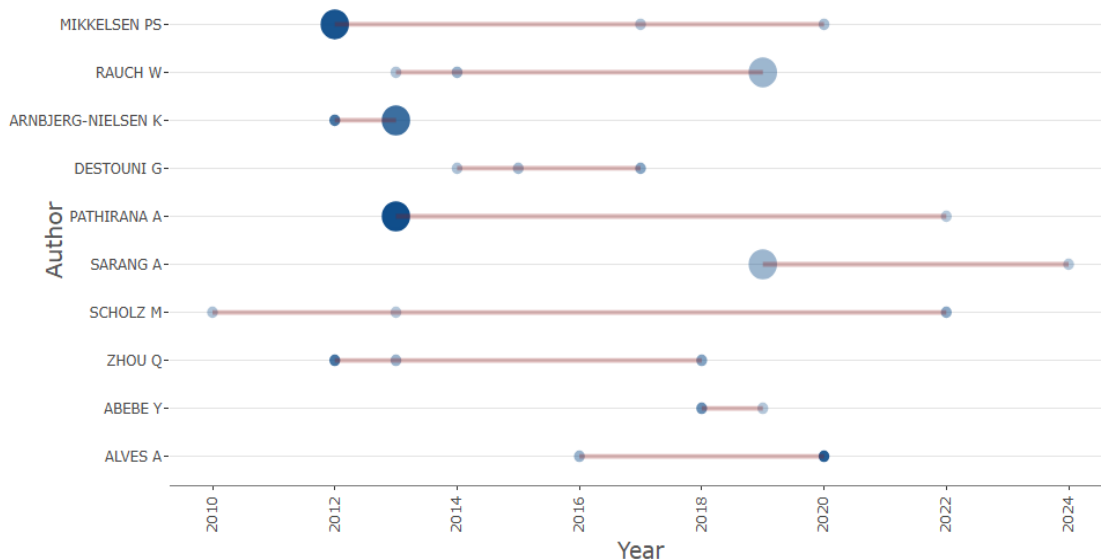
Las investigaciones se han acentuado en momentos específicos y esto se puede comprobar al analizar el periodo estudiado. En la figura 6 se puede observar que desde el 2012 hasta el 2020 ha habido un aumento numeroso respecto a la cantidad de artículos publicados, concordando con un visible auge internacional en el tema. Según esto, los autores como Mikkelsen PS, Pathirana A. y Scholz M. son destacados por haber sostenido una producción constante, teniendo 3 publicaciones relevantes cada uno y un gran número de citas anuales, adicionalmente estos autores no solo se repiten en diversas fuentes, sino que también han conseguido posicionar sus investigaciones como referencia clave dentro del campo.

Este incremento en las investigaciones no solo demuestra el interés creciente en el tema, sino también la urgencia de actuar frente a los efectos del cambio climático en los sistemas de

drenaje. Contar con infraestructuras más eficientes y resilientes es fundamental para proteger a las ciudades de las lluvias extremas y avanzar hacia un desarrollo urbano más sostenible.

Figura 6

Producción de investigaciones de los autores durante el tiempo



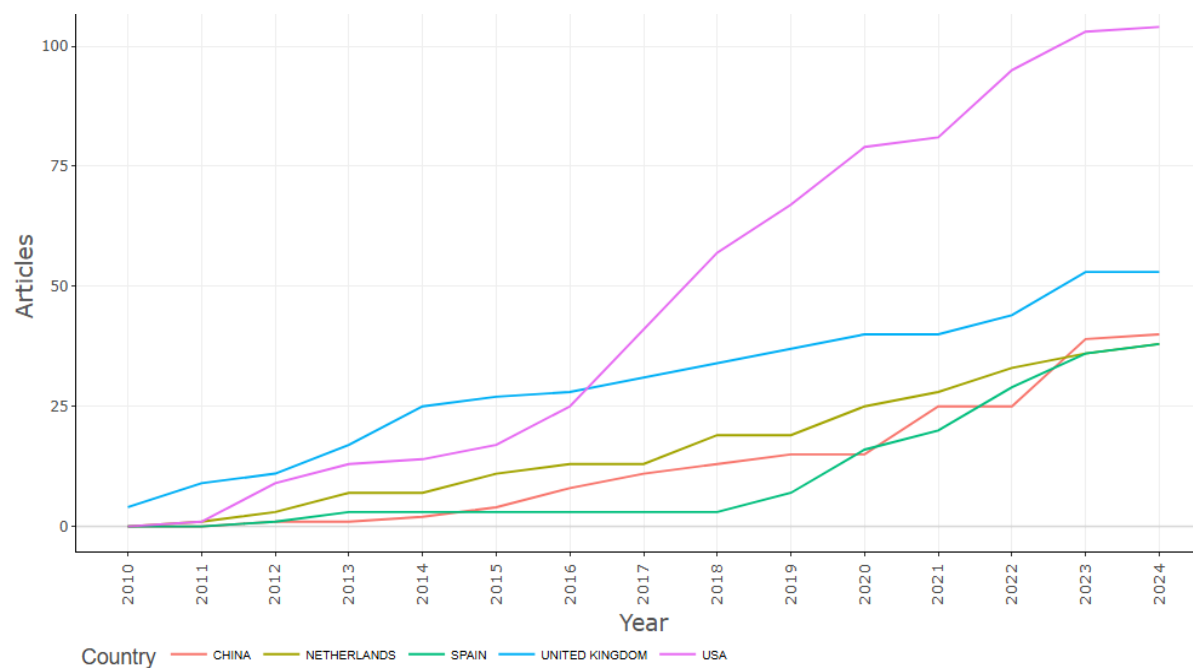
Nota. Datos obtenidos por medio del Software Bibliometrix.

Analizando las contribuciones realizadas por cada país, en la figura 7 se distingue que Estados Unidos, Reino Unido y China son los tres países más contribuyentes en las investigaciones de la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático. Específicamente, Estados Unidos lidera con un total de 104 citaciones, seguido por Reino Unido con 53 y China con 40 citaciones. Esta tendencia se refleja visualmente en la figura 8 a través de la intensidad de los colores: el tono más oscuro y fuerte corresponde a Estados Unidos, demostrando el mayor número de investigaciones, mientras que el azul se vuelve más claro en

función de la cantidad de estudios, como es el caso de Reino Unido y China, que completan el top 3 con tonalidades más suaves en comparación con Estados Unidos.

Figura 7

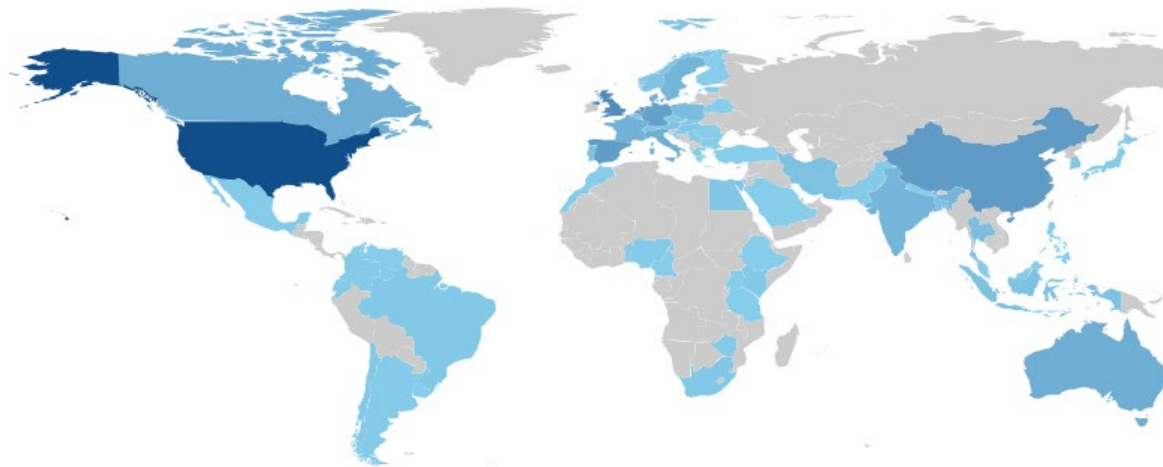
Distribución por años de países más contribuyentes en investigaciones



Nota. Tomada de Software Bibliometrix

Figura 8

Países más contribuyentes en las investigaciones



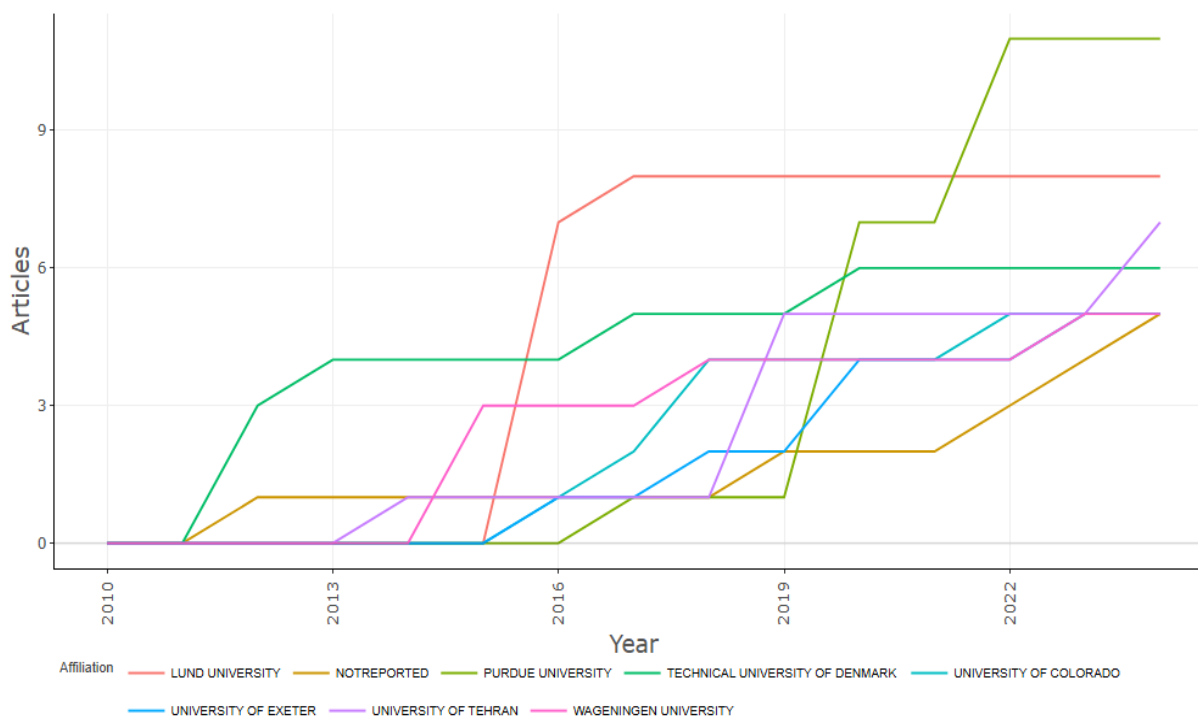
Nota. Tomada de Software Bibliometrix

En el continente sudamericano, estas cifras presentan un crecimiento constante, impulsado por los recientes eventos de inundaciones y las afectaciones en los sistemas de drenaje. En Colombia, ya se registran 3 citaciones relacionadas al tema, mientras que en Argentina, Brasil y Chile cuentan con 5 citaciones cada una, resaltando la relevancia que ha adquirido el tema en la región y en la comunidad científica. Según Iglesias-Rey (2017), el aumento en la intensidad de las precipitaciones, ligado al cambio climático y al crecimiento descontrolado de las ciudades, ha reducido la capacidad de los sistemas de drenaje existentes, haciendo necesaria su rehabilitación mediante modelos de optimización que permitan mejorar su eficiencia y minimizar los riesgos de inundación. Estas cifras confirman el interés por implementar sistemas de drenaje capaces de soportar los altos números de precipitaciones causados por el cambio climático. El desarrollo de ciudades más resilientes y sostenibles no sólo elevaría la calidad de vida de sus habitantes, sino que también fomentaría una relación más equilibrada y respetuosa con el medio ambiente.

En la figura 9 se analizaron las instituciones que han realizado publicaciones durante el periodo de estudio, en las cuales, sobresalen la *Universidad Técnica de Dinamarca* y la *Universidad y Centro de Investigación de Wageningen*, cada una con un total de 6 artículos publicados en este lapso. Entre estas publicaciones, resalta el artículo titulado “*Adaptación a precipitaciones extremas con un sistema de drenaje urbano abierto: un análisis coste-beneficio hidrológico integrado*”. En este trabajo, se exploran diversas alternativas para adaptar los sistemas de drenaje y hacer frente a las precipitaciones extremas, evaluándolas mediante un enfoque cuantitativo que incluye modelado de inundaciones y un análisis socioeconómico de los costos y beneficios asociados.

Figura 9

Artículos de las Instituciones más relevantes en la investigación

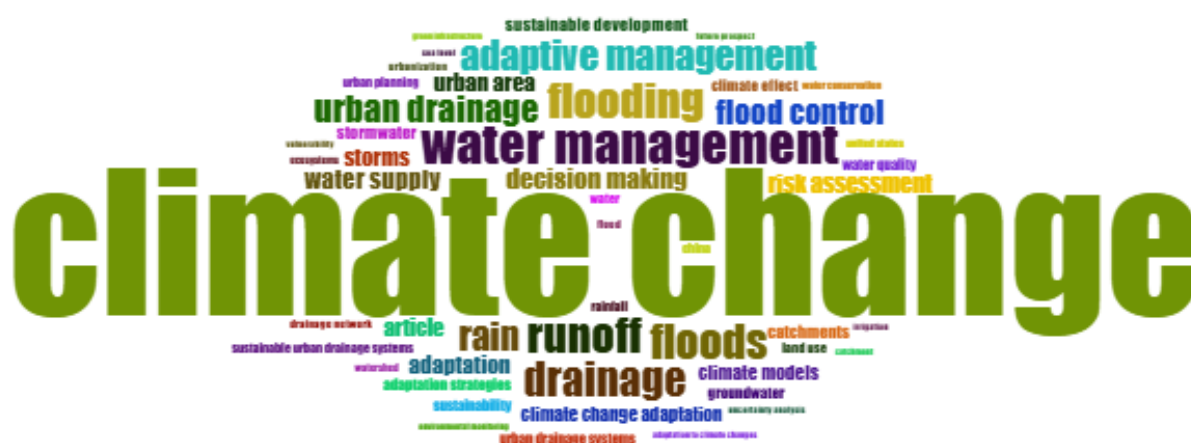


Nota. Tomado de Software Bibliometrix.

En el estudio de la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático se presentan un sin número de palabras utilizadas por los diferentes autores de las cuales se destacarán las más predominantes en las investigaciones. En la figura 10, se observan los términos que han predominado, como cambio climático, escorrentía, gestión del agua, inundaciones, control de riesgos, drenaje urbano y sostenibilidad. El predominio de ciertas palabras clave refleja una tendencia clara en la literatura: el foco está puesto en estrategias de adaptación, evaluación de riesgos y planificación urbana con perspectiva climática. Estos temas se han consolidado como ejes centrales en el abordaje de los impactos que el cambio climático genera sobre los sistemas de drenaje. Al analizar estas frecuencias, se evidencia cómo la comunidad científica ha priorizado líneas de investigación orientadas a mejorar infraestructuras, perfeccionar modelos predictivos y avanzar hacia una gestión integrada del recurso hídrico. Todo ello en respuesta al aumento de las lluvias intensas, uno de los fenómenos más estrechamente ligados a este desafío global.

Figura 10

Palabras más utilizadas en la comunidad científica

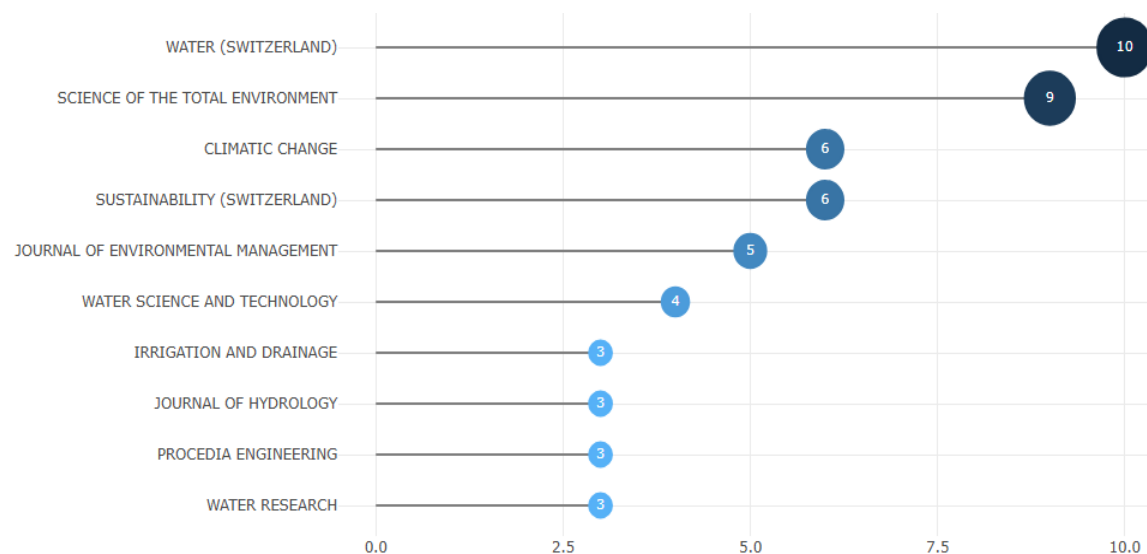


Nota. Tomado de Software Bibliometrix.

En la Figura 11 se presentan las revistas científicas más relevantes utilizadas en el estudio de la adaptación de los sistemas de drenaje. Entre ellas, destaca la revista Agua (Suiza), que encabeza la lista con 10 documentos publicados sobre el tema. Le sigue Ciencia del Medio Ambiente Total con 9 documentos, y Sostenibilidad (Suiza) junto con Cambio Climático, ambas con 6 documentos cada una.

Figura 11

Principales publicaciones científicas



Nota. Tomado del Software Bibliometrix.

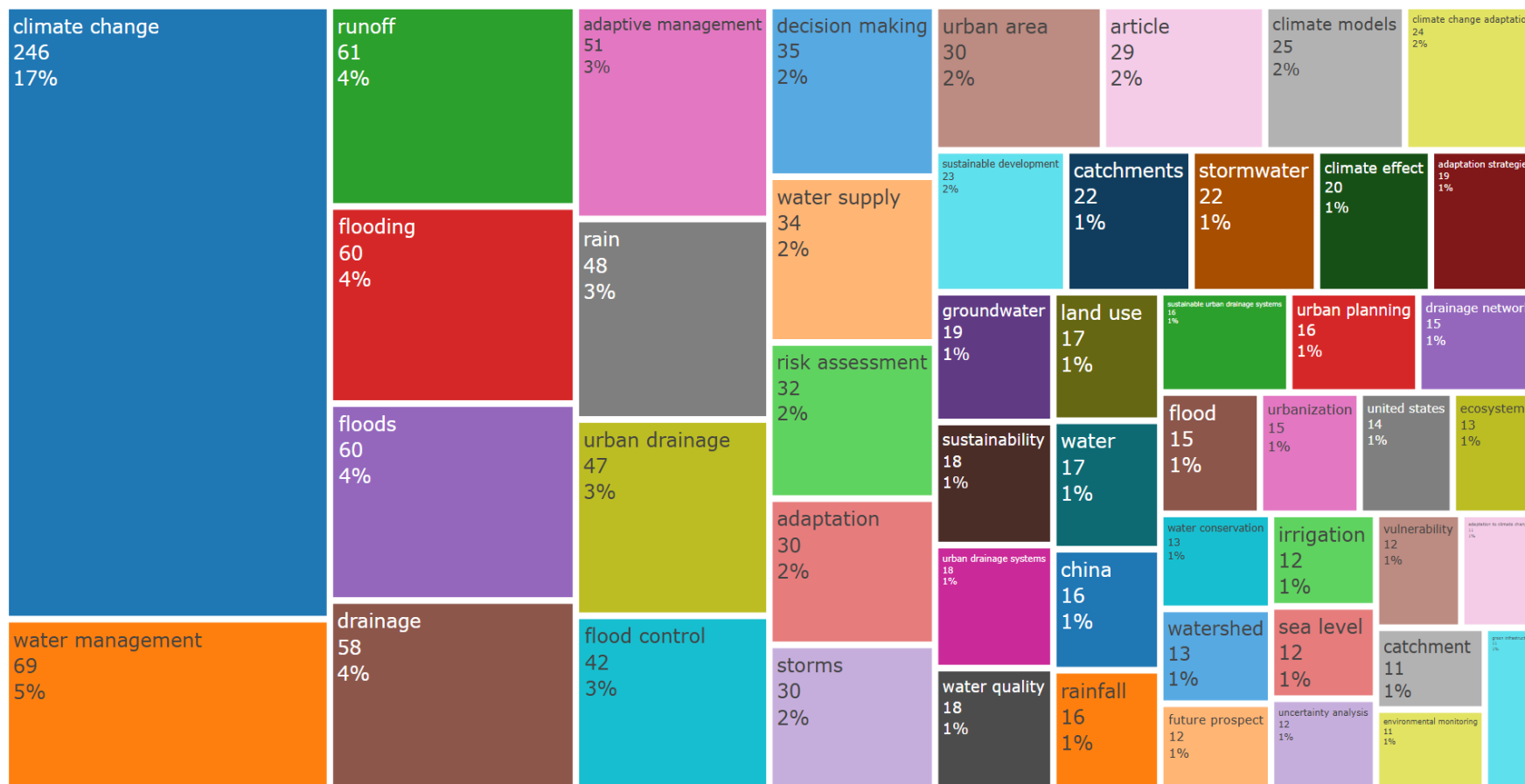
En la figura 12 se puede observar un treemap, en el cual se presenta los términos más utilizados en las investigaciones analizadas. La expresión “*Climate change*” encabeza la lista con una presencia del 17 %, lo que confirma su papel central en la discusión académica. Le siguen “*Water management*” y “*Drainage*”, con un 5 % y 4 % respectivamente, lo que evidencia un interés creciente por los enfoques técnicos y de gestión integrados al fenómeno climático.

Además, se destacan términos como “*flooding, urban drainage*” y “*adaptation*”, reforzando la transversalidad del cambio climático sobre múltiples aspectos de la infraestructura urbana.

Este análisis cuantitativo permite identificar las líneas temáticas predominantes y sirve de base para organizar la revisión documental posterior. Por un lado, las palabras más frecuentes, como cambio climático, drenaje y gestión del agua, representan el 25% de las menciones en los estudios, mientras que las menos frecuentes apenas alcanzan un 3%. Aunque estos términos están interrelacionados, cada uno se aborda de manera independiente y profunda en las distintas investigaciones, lo que refleja la diversidad de enfoques dentro del campo de estudio.

Figura 12

Frecuencia de las palabras claves en la comunidad científica

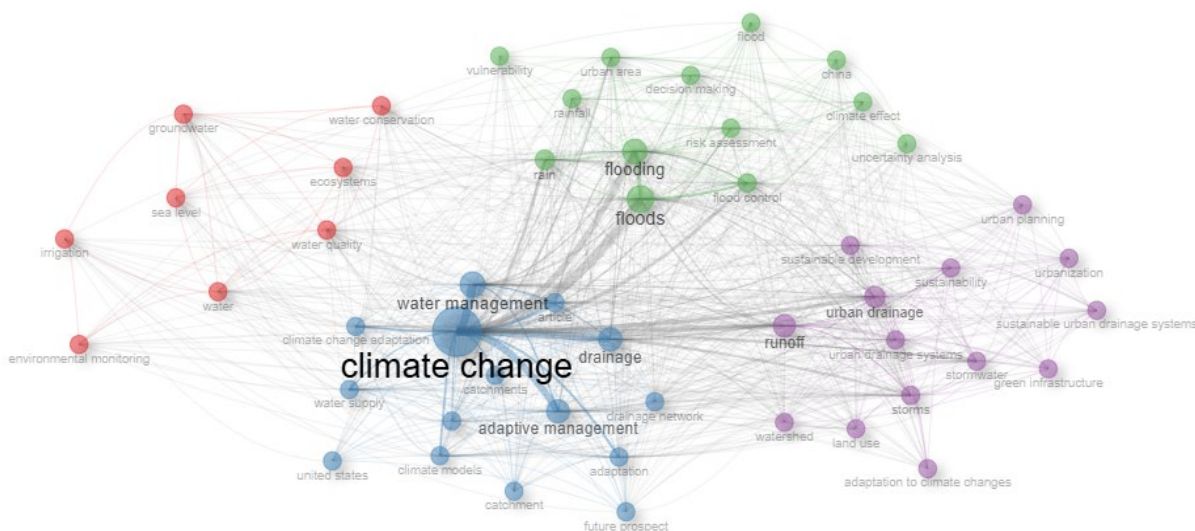


Nota. Tomado del Software Bibliometrix

En la figura 13 podemos observar la red de coocurrencia de las palabras claves obtenidas, según esto se identifican cuatro clústeres temáticos principales como: 1) cambio climático y gestión del agua, (2) inundaciones y vulnerabilidad, (3) drenaje urbano y soluciones sostenibles, y (4) monitoreo ambiental y aguas subterráneas. En el nodo central “*climate change*” aparece como eje articulador, conectando con múltiples términos técnicos, reflejando la transversalidad del tema en la literatura científica reciente. Lo que nos permite evidenciar las principales líneas de investigación actuales.

Figura 13

Red de coocurrencia



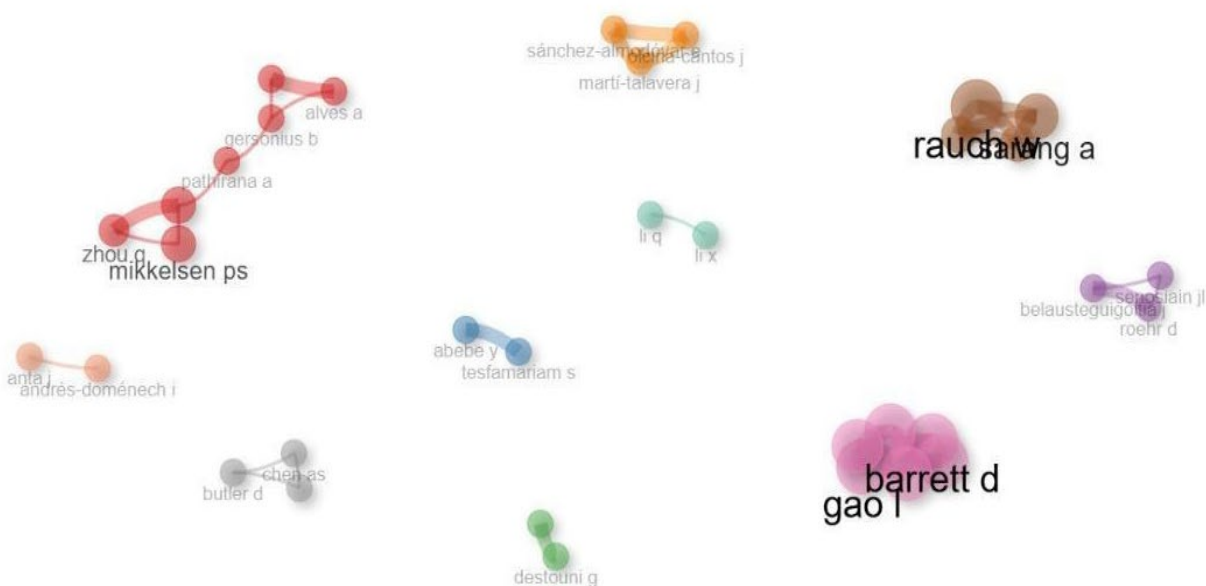
Nota. Tomado del Software Bibliometrix.

En la Figura 14 podemos apreciar las colaboraciones más relevantes que han tenido los autores en las diferentes investigaciones realizadas a este tema de interés, donde podemos destacar las colaboraciones entre Barrett D. – Gao I. y Rauch W. – Sarang A. los cuales son los

que tienen mayor colaboración entre autores, como también tenemos a Zhou G. y Mikkelsen PS, que han participado en diversas colaboraciones con otros autores.

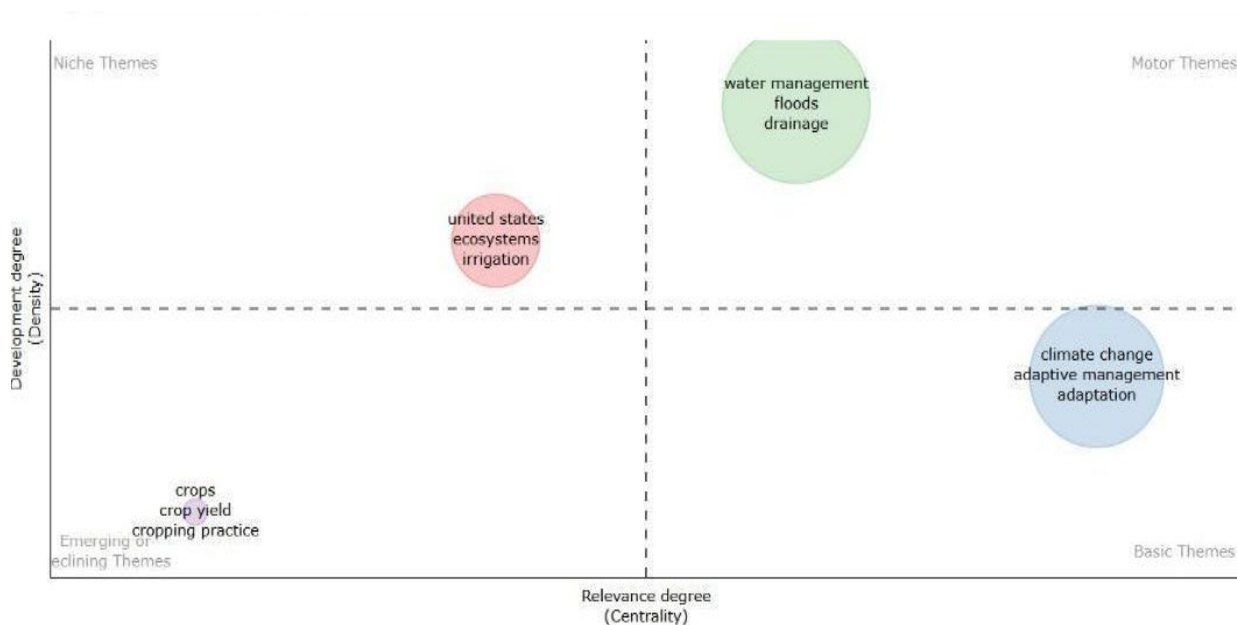
Figura 14

Red de colaboración



Nota. Tomado del Software Bibliometrix.

En el análisis de las palabras más importantes en las investigaciones, hay palabras claves como cambio climático, adaptación, gestión y drenaje que se destacan entre las investigaciones por ser frecuentadas con relevancia entre los autores y también por abarcar conceptos importantes en el tema. Estas palabras claves las podemos apreciar en la figura 15 y ver su ubicación en el grado de relevancia con respecto al eje.

Figura 15*Mapa temático*

Nota. Tomado del Software Bibliometrix.

Ahora bien, analizando la cooperación entre los países durante este intervalo de estudio (Figura 16), Estados Unidos, Reino Unido y España, son los principales países que lideran las colaboraciones entre naciones. Estas colaboraciones entre países permiten compartir información relevante sobre la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático, teniendo en cuenta, que entre países pueden presentar las mismas características (ubicación, clima y crecimiento de población), siendo este un factor favorable al momento de generar estrategias de adaptación que favorezcan a la población y a la sostenibilidad de las ciudades.

Figura 16

Mapa de colaboración entre países



Nota. Tomado del Software Bibliometrix.

1.2 Estado del arte

Los sistemas de drenaje son una pieza fundamental en la infraestructura urbana, pues se encargan de manejar de forma eficiente las aguas residuales y pluviales. Su correcto funcionamiento contribuye a proteger la salud pública, preservar el medio ambiente y mejorar, de forma sostenida, la calidad de vida de las comunidades.

La gestión eficiente del agua en las ciudades depende en su mayoría de que tan efectivos son sus sistemas de drenaje, los cuales tienen como función la evacuación de las aguas pluviales y residuales, estos sistemas se encuentran como redes subterráneas, los cuales son un conjunto de tuberías y conexiones que poseen un papel importante a la hora de proteger la salud pública y a su vez de mantener la integridad de la infraestructura urbana. Los sistemas de drenaje sanitarios tienen como función el transporte de las aguas residuales hasta las plantas de tratamiento, donde

en estas instalaciones, estas aguas se depuran y en algunos casos son reutilizadas posteriormente en actividades que no supongan riesgos para la población. (PCQ, 2013).

Por otra parte, los sistemas de drenaje pluvial recolectan y conducen el agua de lluvia hacia áreas de almacenamiento o las transportan a cuerpos de aguas naturales como lagunas y ríos, contribuyendo a la prevención de inundaciones (World Health Organization, 2006). Además de esta función principal de prevención, también está la posibilidad de reutilizar el agua de lluvia captada en estos sistemas para actividades no potables, como, por ejemplo: actividades domésticas, industriales o comerciales, beneficiando a la administración más consciente y sostenible del recurso hídrico (Comité de Adaptación al Cambio Climático, 2018). En la figura 17 aprecian las funciones de los tipos de alcantarillado: donde el sanitario recoge las aguas residuales de las viviendas y las lleva a una planta de tratamiento (PTAR) y el pluvial, conduce el agua de lluvia por sumideros y canales hasta llevarla a los ríos.

Figura 17

Sistema de drenaje pluvial y sanitario.



Nota. Adaptado de Constructora Tombak (2023)

Los sistemas de drenaje pluviales y sanitarios comparten características en su estructura física, pero sus exigencias operacionales varían notablemente. En el caso del drenaje sanitario se necesita un monitoreo constante y estricto para corroborar la calidad del agua y el cumplimiento de normativas ambientales vigentes. En cambio, el drenaje pluvial requiere procesos flexibles y adaptativos, los cuales deben responder de manera efectiva al cambio climático, especialmente porque en la actualidad cada vez son más frecuentes e intensos.

Con el paso del tiempo se ha comprobado que la preocupación por la gestión del agua no es nueva. Entre el 2600 y el 1900 a.C., las civilizaciones del Valle del Indo desarrollaron redes avanzadas de alcantarillado subterráneo que sorprendieron por su nivel de sofisticación, evidenciando una temprana conciencia sobre la importancia del saneamiento y el manejo de aguas residuales. En ciudades como Mohenjo-Daro y Harappa, las viviendas contaban con baños que estaban conectados a canales construidos con tuberías de terracota, lo cual demostraba un notable nivel de conocimiento en higiene urbana y planificación del espacio público. (Mark, 2020).

Incluso antes del desarrollo hidráulico en el Valle del Indo, en la ciudad sumeria de Nippur, ubicada en lo que hoy es Irak, ya se habían implementado sistemas de evacuación de aguas residuales que datan del 3750 a.C. Aunque eran estructuras más básicas, estos primeros intentos reflejan uno de los primeros esfuerzos por integrar el saneamiento en el entorno urbano, evidenciando cómo las civilizaciones antiguas reconocieron tempranamente su importancia para la vida colectiva. (Vitoviz, 2023).

No se volvió a observar un sistema de alcantarillado con un nivel de complejidad similar al del Valle del Indo hasta aproximadamente el siglo XII d.C., esto confirma el desarrollo avanzado que estas civilizaciones alcanzaron en términos de ingeniería hidráulica y salud pública (Follet, 2020). Estos casos históricos no solo evidencian las capacidades técnicas para su época, sino que también demuestran cómo la gestión del agua ha estado estrechamente vinculada desde sus inicios ligada a la sostenibilidad de las ciudades.

Al pasar el tiempo, el tema referente a los sistemas de drenaje ha ido evolucionando para afrontar las diversas necesidades que se presentan. En este contexto, las lluvias intensas en la actualidad han sobrepasado constantemente la capacidad de muchas infraestructuras urbanas existentes. Por consiguiente, esta problemática demuestra que es necesario integrar soluciones sostenibles que se adapten de forma eficaz a las condiciones climáticas de hoy en día y que además las ciudades empiecen a replantearse la forma en que diseñan estos sistemas.

La recolección y gestión del agua es un asunto de vital importancia, pues su manejo eficiente afecta directamente la calidad de vida de la población (Macea & Hernández, 2014). Por ende, el cambio climático hoy en día es un gran reto, tanto para la humanidad como para la comunidad científica, debido a que el incremento en la intensidad y en la frecuencia de condiciones meteorológicas severas, como las lluvias torrenciales, han causado un incremento relevante en las inundaciones. Por consiguiente, esto comprueba que en la mayoría de los casos la capacidad de los sistemas de drenaje urbanos se ve rebozados, confirmando que son vulnerables ante estos fenómenos meteorológicos.

Morris et al. (2018) exponen que según lo anterior las soluciones para la protección de infraestructuras costeras ejecutadas con la ingeniería tradicional son poco efectivas, tanto desde la perspectiva ambiental como económica. Por lo tanto, se ha puesto en duda la efectividad de estructuras como rompeolas y diques por el aumento de las precipitaciones y de la escorrentía. Evaluando esta situación, los investigadores aplicaron varias metodologías como las imágenes satelitales, el modelado hidrodinámico y las observaciones directas en campo para así poder

comparar la efectividad de las soluciones tradicionales con las alternativas basadas en la naturaleza, como lo son la restauración de humedales, dunas costeras y manglares.

Los resultados obtenidos en este estudio, nos demuestra que las soluciones fundamentadas en la naturaleza como humedales y manglares, no solo cumplen con su objetivo principal, sino que también brindan otras ventajas adicionales. Entre estas ventajas podemos destacar la captación de dióxido de carbono, la reducción de la erosión en las zonas costeras y la recuperación de los ecosistemas que han sufrido daños. Las limitaciones y la falta de financiamiento político son resaltadas por los autores, los cuales expresan que son un obstáculo relevante para la implementación a gran escala.

Debido a la apremiante necesidad de hallar estrategias que sean efectivas al momento de confrontar los distintos desafíos relacionados con la adaptación de los sistemas al cambio climático, se presentan investigaciones que han generado un considerable interés por parte de las diversas disciplinas, profesionalmente y académicamente. Estos estudios que se han venido presentando en el campo de los sistemas de drenaje urbano subrayan la importante necesidad de diseñar infraestructuras basadas en principios firmes de resiliencia y sostenibilidad. En la figura 18 muestra las diferentes técnicas sostenibles para captar, infiltrar o retener las aguas de lluvia, con el fin de reducir las inundaciones y no saturar los sistemas de drenaje urbanos

Figura 18

Estrategias basadas en principios de resiliencia y sostenibilidad.



Nota. Ilustración tomada desde Hidrología Sostenible por (Luis Martin, 2015)

En el documento presentado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE, 2018) podemos apreciar las propuestas y explicaciones de diversas estrategias que ayuden a mejorar la gestión del drenaje urbano. De las diferentes estrategias podemos destacar la integración de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), la implementación de superficies permeables que favorecen la absorción de la escorrentía superficial, la optimización de las redes existentes y la instauración de equipos tecnológicos que ayuden con el almacenamiento de todas las aguas pluviales generadas. Hay países como Estados Unidos, Países

Bajos y Reino Unido que ya vienen evidenciando avances significativos al combinar soluciones innovadoras con métodos tradicionales. Sin embargo, llevar estos logros a otros entornos continúa siendo una tarea difícil, en especial en aquellos países donde hay limitaciones económicas, infraestructuras en mal estado o falta de cooperación entre las instituciones encargadas.

En los próximos capítulos se analizarán de forma detallada las investigaciones importantes sobre los sistemas de drenaje y la capacidad de adaptación que estos tienen frente a los desafíos que presenta el cambio climático. Se llevará a cabo un análisis profundo de las diferentes estrategias implementadas, los métodos utilizados para su aplicación y los resultados alcanzados hasta la fecha.

De igual forma se abordarán ejemplos concretos realizados en América, con énfasis en los casos de Colombia, México, Argentina y Estados Unidos. De igual manera, se incorporarán casos provenientes de Europa, África y Asia, los cuales pueden ofrecer lecciones significativas para reforzar las propuestas de adaptación en los países de América latina.

1.2.1 Investigaciones realizadas en América Latina.

1.2.1.1 Estados Unidos. La administración del recurso hídrico en este país enfrenta diversos retos que cambian según su ubicación y el clima. Por ejemplo, en el este, las lluvias intensas y frecuentes ponen a prueba la capacidad de los sistemas de drenaje urbanos, mientras que, en el noroeste, el deshielo de los glaciares y los cambios en los ciclos hidrológicos generan diversas problemáticas. Esta variedad de escenarios ha llevado a implementar estrategias para mitigar el riesgo de inundaciones y fortalecer la infraestructura

de drenaje frente a los efectos del cambio climático. La figura 19 evidencia uno de los riesgos por el cambio climático, pues gran parte de la ciudad de Juneau quedó bajo el agua debido a una fuerte inundación causada por el deshielo de un glaciar, la cual aumentó el caudal del río y se desbordó hacia las calles y viviendas.

Figura 19

El deshielo de glaciar aumenta el crecimiento del río e inunda la ciudad capital de Juneau.



Nota. Imagen tomada de Ferrer (2025)

Un claro ejemplo de esta preocupación lo representa el estudio de Ye et al. (2023) realizado en Tampa, Florida, el cual analizó cómo la urbanización acelerada, acompañado por los cambios en los patrones de lluvia, están afectando el rendimiento de los sistemas de drenaje en la ciudad. Los investigadores simularon diferentes escenarios futuros mediante el uso de modelos hidrológicos y con estos determinaron que algunas áreas podrían experimentar un incremento de hasta 400 % en zonas inundables, debido al aumento en la intensidad de las lluvias y la disminución de la capacidad de absorción del suelo, producida por la expansión de superficies

impermeables. Estos hallazgos destacan la necesidad de reconsiderar el diseño urbano y la gestión del recurso hídrico en ciudades altamente vulnerables. No obstante, el estudio también enfatizó que las zonas con una infraestructura de drenaje adecuada y con mayor variación en la elevación del terreno reducen parcialmente estos efectos.

Por otro lado, Shen et al. (2022) investigaron el impacto combinado de las lluvias intensas y las marejadas ciclónicas en Norfolk, Virginia, una ciudad costera con una alta vulnerabilidad a las inundaciones. Su investigación modeló distintos escenarios climáticos hasta el año 2070 y reveló que, si en la actualidad las intensas lluvias son la principal causa de inundaciones en la ciudad, en el futuro el aumento del nivel del mar ocasionará que las marejadas sean un factor todavía más crítico. Para entonces, incluso pequeñas marejadas podrían causar inundaciones diarias en algunas zonas. Además, el estudio comparó los métodos tradicionales de modelado con técnicas más avanzadas y concluyó que los modelos más detallados permiten una mejoría en la planificación de las estrategias de adaptación, como la construcción de diques o la mejora de los sistemas de drenaje urbano. En la figura 20 se observa una marejada ciclónica en Estados Unidos; este fenómeno es causado por un huracán, el cual eleva el nivel del mar y genera que las olas impacten en la costa, provocando inundaciones y daños en las zonas costeras, donde el riesgo es mayor.

Figura 20

Marejadas ciclónicas en Estados Unidos por el huracán Florence.



Nota. Ilustración tomada de Américanoticias Diario Miami por (Associated Press, 2018)

En el noroeste del país, Schwat et al. (2023) analizaron los efectos del retroceso glaciar en el Monte Baker, Washington. En la investigación se determinó que el derretimiento de los glaciares ha generado un incremento significativo en la erosión, como en la cantidad de sedimentos que son transportados por los ríos, lo que aumenta notoriamente el riesgo de inundaciones para las poblaciones situadas río abajo. Esta situación se agrava durante la época de fuertes lluvias, demostrando así que la aceleración del cambio climático podría agudizar notablemente estos acontecimientos en un futuro no muy lejano. Estos descubrimientos subrayan la importancia de realizar un monitoreo de forma constante en las zonas glaciares y de establecer medidas para disminuir los efectos negativos relacionados con un exceso de sedimentación.

Lo anteriormente mencionado resalta la importante necesidad de ajustar la manera en que se diseñan y administran los sistemas de drenaje, tal como sucede en las ciudades de Tampa o Norfolk. Es esencial desarrollar alternativas que contemplen intervenciones específicas en la

infraestructura actual, y que, además de esto, fomente una planificación del territorio adaptable basada en los riesgos particulares que cada zona presenta. Un claro ejemplo es lo sucedido en el noroeste del país, donde el incremento de complicaciones como el escurrimiento superficial, la erosión y la acumulación de sedimentos representa un desafío adicional, ya que puede ocasionar daños importantes en las redes hidráulicas y en las comunidades circundantes.

1.2.1.2 México. En el caso de México recientemente se han encontrado estudios que dan a conocer las estrategias que hay para reducir el impacto adverso del cambio climático, siendo algunas de estas la recolección de aguas de lluvia, la adaptación de cubiertas por techos verdes y la implementación de sistemas capaces de emitir alertas anticipadas en las zonas fronterizas, como el caso de Nogales, Sonora y de Nogales Arizona. Para facilitar la administración del agua de manera eficiente y para tener una solución pertinente en casos de lluvias intensas, es de ámbito urgente y esencial la cooperación binacional.

El estudio realizado por Figueroa-Avalos et al. (2024) es una de las investigaciones más útiles en este tema, pues en este se valoran las estrategias como la adaptación de cubiertas por techos verdes y la recolección de aguas de lluvia por medio de barriles en Colima, una región que cuenta con un clima cálido semihúmedo. A través de investigaciones simuladas con la herramienta SWMM, el grupo de investigadores demostró que dichos barriles usados para captar el agua de lluvia, pudieron reducir en promedio un 14,36% del volumen total de escorrentía y que también, los techos verdes ayudaron aún más, consiguiendo reducir hasta el 26,40% de escorrentía en casos de lluvias intensas. Dichos resultados respaldan la efectividad de estas estrategias, especialmente cuando se aplican como parte de planes integrales de adaptación

climática en entornos urbanos vulnerables. A continuación, en la figura 21, se encuentra un ejemplo de un sistema de captación de agua pluvial Rotoplas, fabricado por la empresa mexicana Rotoplas, la cual está especializada en soluciones para el almacenamiento, conducción, purificación y tratamiento de agua. Este sistema recolecta y almacena el agua de lluvia para uso doméstico y que sea apta para su consumo al conectarlo a un purificador, logrando ser una solución sostenible, mitigando los impactos ambientales y mejorando la calidad de vida.

Figura 21

Barriles de recolección de agua lluvia fabricados por la empresa Rotoplas.



Nota. Ilustración tomada de (Rotoplas, 2018)

Por otro lado, el estudio de Freimund et al. (2022) se enfocó en cómo perciben el riesgo de inundación los habitantes de la frontera de Nogales. Allí, las lluvias monzónicas suelen causar daños importantes. Se evidenció a través de encuestas y entrevistas, que, aunque la población es consciente de la magnitud del problema, todavía hay muchas debilidades en cuanto a su preparación y respuesta, por ende se presentaron una serie de propuestas comunitarias, entre las cuales se encuentra la educación sobre la mitigación de riesgos, la innovación de infraestructuras

verdes, la actualización de los sistemas de drenaje y la implementación de sistemas de alerta anticipada en casos de eventos climáticos extremos.

El estudio sobre los sistemas costeros en México de Anderson et al. (2016), el cual se enfoca en el Golfo de México y el Caribe, revelaron que en estas zonas el incremento del nivel del mar y el aumento de las frecuencias de los huracanes generan presiones sobre las infraestructuras de drenaje urbano, por ello los investigadores dicen que la falta de intervenciones preventivas y la carencia en la adaptación estructural pueden terminar en un desgaste progresivo en la infraestructura actual. Debido a esta problemática, se plantean diversas alternativas como lo es principalmente la actualización de los sistemas de drenaje, la restauración de los humedales costeros y el pronóstico hidrológico por medio de modelos o simulaciones, que ayuden a predecir anticipadamente los riesgos y así poder reaccionar de manera rápida y eficaz ante estos eventos.

Con el estudio anterior se puede evidenciar que es necesario poner en práctica alternativas no convencionales y para ellos es indispensable tener una perspectiva completa que relacione las infraestructuras tradicionales con estrategias sostenibles. Esto no significa que el diseño y la construcción de sistemas resistentes requiera solamente el compromiso político para adaptar y actualizar las infraestructuras existentes, requiere también de la capacidad para integrar la tecnología y la política, donde con estas se aseguren una administración sostenible, eficiente y equitativa del agua.

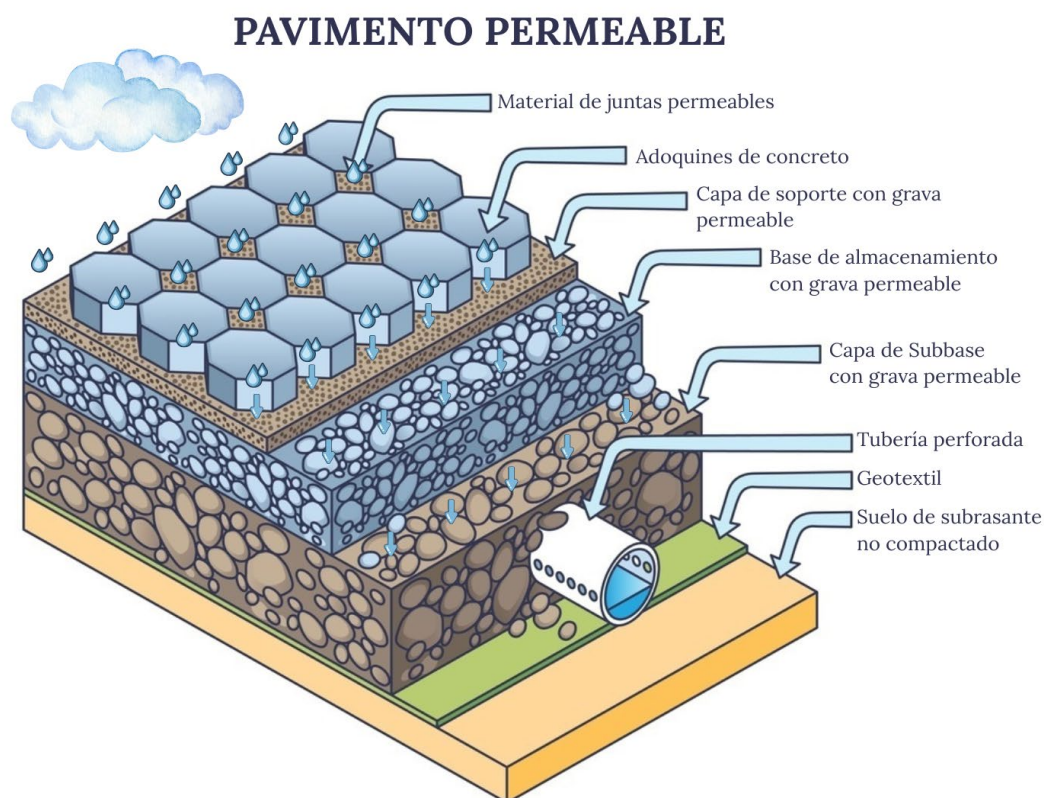
1.2.1.3 Argentina. Para el caso de Argentina, la variabilidad climática particularmente en la región pampeana se refleja en patrones de precipitación irregulares que complejizan la gestión del recurso hídrico (Aliaga et al., 2012). Además, el avance de la frontera agrícola ha generado transformaciones en el uso del suelo, impactando tanto las áreas rurales como urbanas. En respuesta a estos desafíos, se han impulsado enfoques innovadores de gestión, como la Infraestructura Azul-Verde (Blue-Green Infrastructure, BGI), que combina soluciones naturales y grises para fortalecer la resiliencia hídrica urbana, con experiencias destacadas en Buenos Aires (Aliaga et al., 2012; Kozak et al., 2020)

Una de las contribuciones más relevantes acerca de la función de las áreas verdes en la reducción de inundaciones fue desarrollada por Zimmermann et al. (2016), este estudio demuestra que la escasez de espacios naturales en las zonas urbanas disminuye radicalmente la capacidad del suelo de absorber el agua de lluvia, causando elevados niveles de escorrentía cuando se presentan cambios climáticos extremos. Como resultado de este estudio se resalta que es de vital importancia empezar a incorporar más infraestructuras verdes, como por ejemplo los parques, jardines, pavimentos permeables o los suelos no compactados; en este sentido estas infraestructuras ayudarían a mitigar gran cantidad de agua acumulada en las zonas más críticas de las ciudades.

Por ejemplo, en La figura 22 se puede ver la estructura de un pavimento permeable, permitiendo apreciar detalladamente su desempeño.

Figura 22

Capas de un pavimento permeable.



Nota. Ilustración adaptada de (Shutterstock, 2023)

Del mismo modo Whitworth-Hulse et al. (2023), compararon el impacto que ha tenido la expansión agrícola sobre el equilibrio hídrico en la región pampeana. En las últimas tres décadas, el aumento de cultivos, principalmente el de soja y de maíz, han generado alteraciones significativas en la dinámica hídrica del suelo, al no tener la implementación adecuada de los sistemas de drenaje o riego. Este estudio evidenció que hay un ascenso progresivo del nivel freático en varias áreas, lo cual interfiere con los procesos naturales de infiltración y de absorción del agua.

El aumento del nivel freático manifiesta efectos contradictorios, ya que en épocas de sequía, la cercanía de agua subterránea resulta beneficiosa, pues funciona como una reserva o fuente adicional que ayuda a sostener la productividad agrícola, sin embargo en épocas de lluvias superiores al promedio, esta misma condición se convierte en un factor de riesgo ya que la saturación previa del suelo reduce su capacidad de absorber nuevos aportes hídricos, incrementando significativamente el riesgo a inundaciones y anegamientos. Este escenario en el que una ventaja hidrológica puede transformarse también en una amenaza plantea un desafío importante, el cual requiere de nuevos enfoques de gestión integrados y adaptativos. Los investigadores advierten que, si se mantiene el patrón de aumento de precipitaciones sin una intervención oportuna sobre el manejo del drenaje agrícola, es probable que los efectos negativos se intensifiquen a corto plazo. (Whitworth-Hulse et al., 2023)

En este sentido, mientras que en las zonas urbanas la implementación de infraestructura verde emerge como una herramienta clave para reducir el riesgo de inundaciones y mejorar la calidad del entorno, en las zonas rurales es diferente, dado que se centran en alcanzar un manejo equilibrado de la expansión agrícola y la conservación de los recursos hídricos subterráneos. Para que sea un éxito alguno de estos escenarios, se necesita una planificación cuidadosa y un compromiso sostenible a las soluciones de las problemáticas específicas en cada territorio.

1.2.1.4 Colombia. Colombia ha experimentado un acelerado proceso de urbanización, alcanzando un 82,65 % de población urbana en 2024, el valor más alto de su serie histórica. Paralelamente, el cambio climático ha intensificado los eventos extremos, lo que pone a prueba la gestión eficiente del drenaje urbano en el país (IPCC, 2021). En este contexto, las

investigaciones recientes se orientan hacia el análisis e identificación de métodos más sostenibles y adaptables, que fortalezcan la resiliencia y la capacidad operacional de las infraestructuras de drenaje.

Como se mencionaba anteriormente, en Colombia recientemente ha ido aumentando el número de investigaciones respecto a este tema, pero hay un estudio en específico realizado por Ortega et al. (2023), donde se dispone a analizar y a evaluar qué tan eficientes son los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en situaciones extremas. En esta investigación se emplearon simuladores hidráulicos e hidrológicos para diferentes situaciones, dando como resultado que implementar alternativas como la integración de techos verdes, los tanques de almacenamiento temporal y los pavimentos flexibles merman considerablemente la presión sobre los sistemas de drenaje en situaciones críticas.

El estudio realizado por Iglesias-Rey et al. (2017) comparte una visión similar a la anterior, sin embargo, esta investigación se basa en el caso de Bogotá, donde se inspecciona la innovación de la infraestructura pluvial existente para darle un enfoque técnico y a su vez económico. Con la ayuda del software SWMM se identificaron las intervenciones estratégicas específicas, como el mejoramiento de las estaciones de bombeo y la implementación de tanques de almacenamiento, mejorando la optimización del funcionamiento del sistema sin necesidad de una renovación integral. Al ejecutar estas estrategias se demostró su eficacia al evidenciar los importantes beneficios y la importante reducción de los costos.

Del mismo modo se han realizado contribuciones significativas en las zonas rurales, uno de estos aportes fue el realizado por Loaiza et al. (2024), en este reciente análisis examinó de qué manera influyen directamente distintas prácticas agrícolas sobre la emisión de gases de efecto invernadero, centrándose principalmente en los sistemas de riego implementados para el cultivo de arroz, como también en la liberación de metano y óxido nitroso. Aunque este estudio tenga un énfasis en entornos agrícolas, esta investigación nos ofrece resultados importantes para la zona urbana, evidenciando que una administración eficiente del agua no solo minimiza el impacto ambiental, sino que además de eso, fortalece la capacidad de los sistemas para lidiar con las consecuencias del cambio climático. Las técnicas como la gestión controlada del drenaje y la recolección de aguas lluvias resultaron ser efectivas para disminuir la carga ambiental y mejorar la capacidad de adaptación.

Estas investigaciones subrayan la inminente necesidad de que, en Colombia, se fomenten políticas públicas que respalden de manera activa la ejecución de estrategias sostenibles en la planificación y desarrollo de las ciudades. Integrar sistemas como los SUDS y el modernizar las diferentes redes de drenaje puede marcar una gran diferencia en la prevención de inundaciones y en la adaptación al cambio climático. Hacia el futuro, será clave que las autoridades trabajen en la actualización de normativas y en la inversión en infraestructura verde para que las ciudades sean más seguras, resilientes y sostenibles.

Los estudios recopilados de países como Estados Unidos, México, Argentina y Colombia evidencian una preocupación creciente por la capacidad de los sistemas de drenaje urbano ante los efectos del cambio climático. Aunque todos coinciden en la necesidad de adaptar la

infraestructura, las soluciones adoptadas responden a las particularidades sociales, económicas y tecnológicas de cada país. Mientras que en Estados Unidos se apuesta por la modelación avanzada y la integración de escenarios climáticos en la planificación urbana, en países como Colombia o México prevalece el uso de infraestructura verde y estrategias de bajo costo adaptadas al contexto local. Esta diversidad de enfoques evidencia la necesidad de considerar tanto la capacidad técnica como los recursos disponibles al diseñar medidas de adaptación.

1.2.2 Estudios realizados en otras regiones

1.2.2.1 Asia. Muchas ciudades de la región están viviendo un aumento alarmante en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como lluvias torrenciales, desbordamientos de ríos y monzones intensificados que están ejerciendo una fuerte presión sobre los sistemas de drenaje urbano existentes. Un análisis global revela que gran parte de las inundaciones urbanas entre 2000 y 2018 ocurrieron en Asia, con 398 casos documentados, cifra que supera ampliamente a otros continentes (Wang et al., 2022). En ciudades como Pekín, el cambio climático combinado con el efecto de las *islas de calor urbano* ha incrementado la frecuencia de lluvias extremas, superando la capacidad de drenaje y causando inundaciones generalizadas (Journal of Water and Climate Change, 2022). Por su parte, en Can Tho (Vietnam), el crecimiento urbano acelerado y el aumento del nivel del agua proyectado bajo escenarios de cambio climático y subida del nivel del mar anticipan un incremento significativo en el riesgo de inundaciones en el futuro próximo (Huong & Pathirana, 2013)

En India, Perumal y Sahoo (2010) estudiaron cómo el proceso de urbanización ha afectado la capacidad de las ciudades para enfrentar las inundaciones. Los autores señalan que el

crecimiento acelerado de las ciudades ha disminuido drásticamente la infiltración del suelo, lo que ha incrementado la escorrentía superficial y, con ello, el riesgo de inundaciones súbitas. Como ejemplo concreto, el estudio señala que cada año alrededor de 7,55 millones de hectáreas en India se ven afectadas por inundaciones, lo que se traduce en pérdidas significativas de cultivos, daños estructurales a viviendas y un alto número de víctimas humanas y animales. En la figura 22 corresponde a la inundación en Sikkim, en el norte de India, donde las lluvias intensas causaron el desbordamiento del río Teesta cerca de la Ciudad de Singtam, este evento dejó 14 personas fallecidas y más de 120 desaparecidos, además de comunidades incomunicadas.

Figura 22

Inundaciones en el estado de Sikkim, en el norte de la India.



Nota. Ilustración tomada de (DW, 2023)

Aunque se han llevado a cabo diversas obras como represas, diques y canales para el drenaje de aguas, estas medidas han resultado insuficientes frente a la velocidad y magnitud con que avanza el cambio climático actualmente. Esto ha causado ciertos cuestionamientos acerca de la sostenibilidad de los métodos tradicionales y ha impulsado discusiones sobre la necesidad

urgente de transitar hacia enfoques más integrales, combinando infraestructuras convencionales con alternativas basadas en la naturaleza.

Pervin et al. (2020), apartaron un análisis regional muy relevante al examinar los efectos de las inundaciones en zonas de Sylhet, en Bangladesh, y Bharatpur, en Nepal, evidenciando cómo esta problemática se manifiesta de diferentes maneras según las condiciones geográficas y socioeconómicas de cada territorio. En ambos casos, los factores que más han incrementado la vulnerabilidad frente a lluvias intensas son la deficiencia de los sistemas efectivos de drenaje y la acumulación de residuos sólidos.

En Sylhet, por ejemplo, los investigadores encontraron que aproximadamente el 22 % de la ciudad está expuesto al riesgo constante de inundaciones, porcentaje que podría aumentar considerablemente si no se realiza una actualización adecuada de la infraestructura urbana. Según los autores, más allá de los efectos propios del cambio climático, la falta de planificación adecuada y el insuficiente mantenimiento urbano siguen siendo determinantes para entender la gravedad de las inundaciones. Por su parte, en Bharatpur, la rápida expansión urbana ha provocado la reducción drástica de áreas permeables, situación que deriva en frecuentes acumulaciones de agua en calles y avenidas durante episodios de lluvia intensa.

Por otro lado, Chai et al. (2020) realizaron un análisis a nivel global sobre cómo el cambio climático y las actividades humanas han alterado el flujo de los ríos en Asia. Su investigación identificó que, en muchas regiones de Asia, la construcción de presas y el cambio en los patrones de precipitación han llevado a una "homogeneización" de los caudales de los ríos,

es decir, la diferencia entre las temporadas de lluvias y sequías se ha reducido considerablemente. En otras partes del continente, el panorama es distinto, pero no menos preocupante. La reducción de glaciares y el aumento en las tasas de evaporación han generado un efecto dual: mientras las temporadas secas se vuelven más prolongadas y áridas, las lluvias, cuando llegan, lo hacen con una intensidad tal que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo. Esta combinación de extremos refuerza la necesidad de adoptar enfoques de gestión hídrica que contemplen tanto las variaciones naturales del clima como el impacto de las intervenciones humanas en el territorio.

En este contexto, el estudio de Manandhar et al. (2023) analizó cómo diferentes ciudades del sur de Asia están abordando el problema de las inundaciones. Si bien se ha logrado cierto avance con la implementación de modelos hidrológicos avanzados como HEC-RAS y SWMM, los autores advierten que persisten obstáculos importantes, entre ellos la falta de datos confiables y las deficiencias en la infraestructura básica. Ante estas limitaciones, el estudio propone integrar soluciones basadas en la naturaleza, como parques inundables, techos verdes y corredores hídricos, que además de reducir el riesgo de inundación, ofrecen beneficios ambientales y sociales.

Se puede concluir que, reducir el impacto de las inundaciones en estas regiones requerirá mucho más que tecnología avanzada. Reforzar la infraestructura de drenaje, mejorar la gestión de residuos sólidos y promover soluciones sostenibles serán claves para un manejo más eficiente del recurso hídrico, especialmente en ciudades que enfrentan tanto problemas de exceso como de escasez de agua.

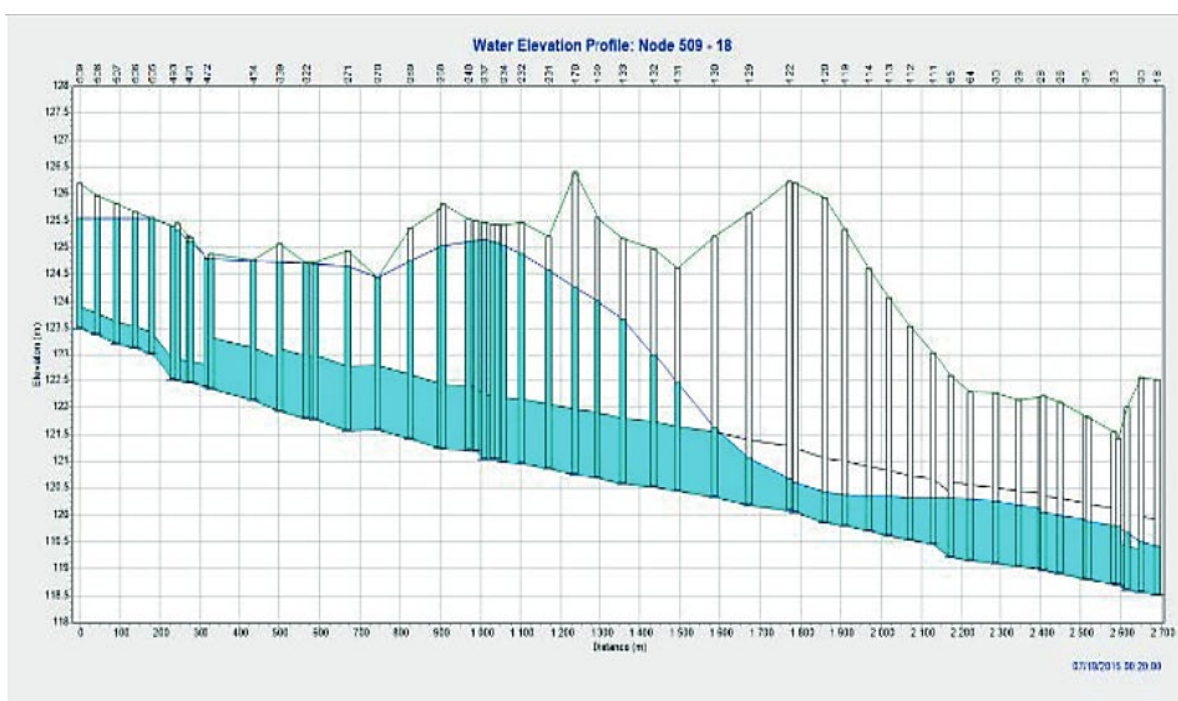
1.2.2.2 Europa. Las inundaciones urbanas se han visto intensificadas tanto por las lluvias extremas como por el aumento del nivel del mar, lo que ha impulsado la adopción de enfoques más diversos y adaptativos. En los Países Bajos, el programa *Room for the River* constituye un ejemplo de estrategia híbrida: combina obras de ingeniería con la restauración de llanuras de inundación para gestionar caudales extremos y proteger zonas urbanas densamente pobladas (Klijn et al., 2015). De forma complementaria, en ciudades como Eindhoven, la incorporación de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) y pavimentos permeables ha mostrado ser eficaz para reducir el área y la profundidad de la escorrentía en eventos de lluvia intensa, evidenciando que estas experiencias integran soluciones técnicas con infraestructuras basadas en la naturaleza, con el fin de fortalecer la resiliencia hídrica urbana frente a los impactos crecientes del cambio climático (Costa et al., 2021).

En Wroclaw, Polonia, por ejemplo, el estudio de Nowakowka et al. (2019) evidenció que buena parte del sistema de alcantarillado urbano no está preparado para las lluvias intensas que hoy se registran con mayor frecuencia. A través del uso de modelos hidrodinámicos, los investigadores demostraron que las tormentas actuales están generando sobrecargas en redes de drenaje que fueron diseñadas con base en condiciones climáticas que ya no reflejan la realidad. Como respuesta, proponen aumentar la capacidad de los sistemas existentes e implementar medidas complementarias como reservorios de retención y zonas verdes permeables, que ayuden a controlar el exceso de agua durante los momentos críticos. En la figura 23 se observa cómo funciona el colector principal KD1 durante una tormenta en el minuto 20, que es cuando presenta una sobrecarga, en este momento más o menos en la tercera parte de la tubería el agua ya no

fluye libremente, porque la tubería está llena y por ende fluye es a presión; además se pueden identificar varios puntos críticos donde el agua acumulada en el alcantarillado llega hasta el nivel de la superficie, lo cual significa riesgos de rebosamientos y a su vez de inundaciones.

Figura 23

Perfil del alcantarillado principal en Wroclaw en el minuto 20 de duración real de la lluvia con $C = 5$ años y $t = 42$ minutos



Nota. Ilustración tomada de Nowakowka et al. (2019)

Una mirada más a futuro la presenta el estudio de Wartalska y Kotowski (2020), quienes analizaron las proyecciones de precipitación para la ciudad de Wroclaw hasta el año 2050. La investigación señala que en los próximos años las lluvias cortas pero intensas se harán mucho más frecuentes. Frente a este desafío, los investigadores sugieren adoptar enfoques más adaptativos, recomendando específicamente la implementación de infraestructuras verdes como

cubiertas vegetales en techos y pavimentos permeables, permitiendo con esto, una absorción directa del agua en el terreno, con el objetivo de reducir los problemas derivados de escorrentías excesivas.

Un estudio distinto desarrollado en Slupsk por Fitobor et al. (2022) utilizó una herramienta conocida como Extreme Weather Layer (EWL), la cual combina modelos geoespaciales con sistemas hidráulicos para identificar áreas particularmente sensibles ante eventos extremos. Este método permitió planificar intervenciones focalizadas, combinando la introducción de infraestructura verde con medidas estratégicas de planeación urbana. Como resultado, la anticipación a las zonas de mayor riesgo y la optimización en la gestión del agua lograron disminuir considerablemente las inundaciones en calles y espacios públicos.

Por otro lado, en Ljubljana (Eslovenia), Pérez-Corredor et al. (2024) analizaron diferentes soluciones basadas en la naturaleza como pavimentos filtrantes, techos vegetados y estanques para almacenamiento temporal, para evaluar su capacidad en reducir la escorrentía urbana y periurbana. Sus resultados indicaron que estas intervenciones combinadas pueden alcanzar una disminución del 32,4 % del volumen total de escorrentía, además de reducir significativamente los caudales pico generados durante tormentas intensas.

A diferencia de muchas ciudades en América o Asia, que usualmente adoptan soluciones después de enfrentar desastres graves, en Europa prevalece una planificación anticipada que utiliza marcos regulatorios sólidos y sofisticadas herramientas predictivas. Esto ha sido facilitado por la disponibilidad de mayores recursos técnicos y financieros, permitiendo acciones complejas

como renovar integralmente las redes de drenaje existentes o desplegar infraestructuras verdes de gran escala. Esta capacidad de anticipación, más allá de representar una ventaja tecnológica, se traduce en ciudades mejor preparadas para enfrentar tanto los retos climáticos actuales como futuros.

1.2.2.3 África. En África, las inundaciones urbanas se han intensificado notablemente, impulsadas por una expansión urbana acelerada y la falta de infraestructuras eficaces para gestionar el agua. Un estudio en Antananarivo (Madagascar) revela una correlación clara entre la migración hacia zonas urbanas, la construcción sin planificación adecuada y la ubicación de edificaciones en áreas de riesgo hídrico, el 32 % de la población vivía en zonas proclives a inundaciones en 2018 (Ramiamanana & Teller, 2021). En ciudades costeras como Lagos (Nigeria), la rápida urbanización ha agravado el riesgo de inundaciones, especialmente en asentamientos informales, donde la combinación de pavimentos impermeables y drenajes deficientes agrava el problema (Kasim et al., 2021). Estos hallazgos evidencian que el crecimiento urbano sin una infraestructura adecuada expone tanto a zonas rurales como a áreas densamente pobladas a desastres naturales. En la figura 24 se observa que la rápida urbanización y a su vez la poca planificación territorial, incrementa la vulnerabilidad de Accra ante fenómenos extremos, dificultando el funcionamiento de los sistemas de drenaje y generando inundaciones.

Figura 24

Vista aérea de Accra, Ghana, ciudad que forma parte de un cinturón urbanizado que se extiende desde Costa de Marfil hasta Nigeria.



Nota. Ilustración tomada de (Sette, 2021)

Una investigación realizada por Blakime et al. (2024) reveló que más del 53,4 % de las áreas periurbanas presentan niveles elevados de vulnerabilidad ante inundaciones en la zona de Lomé, la capital de Togo. Usando sistemas de información geográfica (GIS) y herramientas de teledetección, el equipo identificó los principales factores de riesgo: acumulación de agua en terrenos bajos, lluvias intensas y la ausencia de redes de drenaje funcionales. A esto se suma la rápida impermeabilización del suelo debido al crecimiento urbano sin control, lo que impide la infiltración del agua y acentúa la escorrentía superficial. El estudio destaca la necesidad urgente de contar con mapas de riesgo actualizados que sirvan como base para la toma de decisiones en prevención y gestión del riesgo.

En Sudáfrica, Munzhedzi et al. (2024) analizaron las lluvias extremas entre 1981 y 2023, específicamente en la región de Vhembe (Limpopo). Los datos muestran un aumento

considerable en las precipitaciones, con eventos que superan en más del 99 % los promedios históricos. Las inundaciones no sólo equivalen a factores climáticos, sino también al deficiente manejo de residuos, la insuficiente cobertura de drenaje urbano y la abundancia de asentamientos en zonas vulnerables. Según estas circunstancias se puede afirmar que, para la adaptación al clima, es importante reflexionar sobre el manejo del suelo y la expansión urbana.

Muwafu et al. (2024) plantea la adopción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), arriesgándose por soluciones que estén basadas en la naturaleza, como jardines de lluvia y techos verdes, pues estas alternativas a diferencia de las convencionales buscan imitar el comportamiento natural del ciclo hidrológico, facilitando la absorción del agua y la reducción de escorrentía superficial. A pesar de esto, dicho estudio señala que la implementación de estas estrategias es limitada, por la falta recursos o políticas que respalden su adopción. Esta circunstancia deja claro que, para alcanzar soluciones sostenibles, se debe contar con instituciones robustas y con la financiación adecuada.

Dichos estudios evidencian que las inundaciones en África no solo se dan por la intensidad de las lluvias, sino que también están implicados problemas estructurales más profundos. Como se conoce actualmente, en muchas ciudades se ha observado un crecimiento urbano descontrolado, ausencia de planificación territorial y falta de adecuados sistemas de drenaje han formado un ambiente propenso a desastres, en donde los eventos extremos se convierten en un instante en crisis sociales y ambientales.

Sin importar la situación, han empezado a salir a la luz experiencias locales que buscan soluciones sostenibles. Gran parte de la comunidad están promoviendo soluciones descentralizadas, como los jardines pluviales o techos verdes, que contribuyen a manejar el agua y además esta estrategia es usada en regiones del sur global, cómo América latina. Esto abre campo a oportunidades para la colaboración entre los países del sur, promoviendo el intercambio de conocimiento y el fortalecimiento de capacidades frente al cambio climático.

Sin embargo, aún quedan muchos vacíos por llenar dentro del ámbito académico. Uno de los principales desafíos es la falta de estudios a largo plazo que evalúen el comportamiento real de estas infraestructuras verdes con el paso del tiempo. Aunque ya se ha documentado la viabilidad técnica de soluciones como los pavimentos permeables o los techos verdes, son pocas las investigaciones que han seguido su desempeño en distintos contextos climáticos o después de varios años de uso. Esta falta de evidencia limita la capacidad de toma de decisiones informada y la posibilidad de replicar buenas prácticas en otros entornos con condiciones similares.

Otro vacío importante en la literatura es la escasa atención que se ha prestado a la relación entre el crecimiento urbano desordenado y la eficiencia de los sistemas de drenaje a distintas escalas. En muchas ciudades, la planificación hídrica se realiza sin proyectar escenarios de expansión urbana futura, lo que deriva en redes insuficientes o mal ubicadas. Este desfase entre la ciudad que crece y el sistema que permanece estático genera desbordamientos que podrían evitarse con una visión más anticipatoria del desarrollo urbano.

Revisando las investigaciones por regiones, se evidencia que los enfoques varían según la necesidad o contexto. En Estados Unidos y Europa las investigaciones se han centrado en el desarrollo de tecnologías y modelos hidrológicos que sean capaces de predecir eventos extremos. Hay ciudades donde ya se ha empezado a utilizar simulaciones hidrodinámicas para anticipar el rendimiento que van a tener los sistemas de drenaje en circunstancias críticas, como es el caso de ciudades como Tampa y Norfolk. Por el contrario, sucede con África y Latinoamérica, ya que se han enfocado a examinar las diversas estrategias o soluciones que sean tanto asequibles como sostenibles y que se adapten a las capacidades de cada región. Ahora bien, la implementación de techos verdes en Argentina y México, han mostrado una mejora significativa en la capacidad del suelo para captar el agua de lluvia, disminuyendo notablemente la escorrentía. Por el contrario, en el continente africano, se subraya la importancia de que la comunidad esté involucrada activamente en la toma de decisiones y entienda la importancia del conocimiento local para adaptar las soluciones a la realidad existente, dado que hay pocas infraestructuras básicas.

En Asia han optado por darle a las estrategias un enfoque híbrido, integrando tecnologías digitales y sistemas de supervisión en tiempo real. Incluyendo también tácticas ambientales como la preservación de ecosistemas y la creación de zonas verdes de amortiguación. Entre las localidades de este continente que ya presentan estas mezclas de estrategias está Nepal, Bangladesh y la India, mejorando así la respuesta ante inundaciones y sin descuidar la restauración del entorno natural.

Lo que ensambla estas investigaciones a pesar de las diferencias regionales, es la incorporación de herramientas predictivas, que ayudan a visionar los riesgos y a planificar con

una mayor precisión. Paralelo a esto, las soluciones naturales traen beneficios ambientales, además de su adaptabilidad y bajo costo, las convierte en una opción atractiva para países con recursos limitados.

No obstante, una dificultad persistente en muchos de estos países es la falta de implementación a escala real. Aunque las estrategias han demostrado funcionar en proyectos piloto o estudios de caso, aún no logran integrarse de forma oficial en las normativas urbanas ni convertirse en políticas públicas consolidadas. Avanzar hacia esa institucionalización será clave para convertir estas soluciones en parte integral del desarrollo urbano del futuro. Esto se debe, en buena medida, a la falta de financiamiento y a la resistencia política para adoptar nuevos modelos de gestión del agua.

Otra limitación es la escasez de estudios comparativos entre diferentes regiones del mundo. Aunque existen investigaciones sobre la adaptación de los sistemas de drenaje en diversas ciudades, pocos estudios han comparado la efectividad de distintas estrategias en contextos geográficos y climáticos similares. Esto dificulta la identificación de mejores prácticas que puedan ser replicadas en diferentes partes del mundo.

Además, muchas investigaciones se centran en la adaptación de infraestructuras urbanas sin considerar la integración de soluciones híbridas que combinen drenaje convencional con drenaje sostenible. Esto limita la posibilidad de desarrollar estrategias que sean tanto viables económicamente como efectivas en la reducción de inundaciones.

El estado del arte sobre la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático muestra avances significativos en la identificación de estrategias efectivas y en el desarrollo de modelos predictivos. Sin embargo, aún existen desafíos importantes, como la falta de estudios a largo plazo, la escasa integración de factores socioeconómicos y la limitada implementación de soluciones a nivel práctico. Para avanzar en la adaptación de los sistemas de drenaje al cambio climático, no basta con mejorar la infraestructura o aplicar tecnologías emergentes. Sino que además es necesario establecer una comunicación constante entre las distintas disciplinas, como lo son hidrología, urbanismo, ingeniería, ecología y ciencias sociales deben tener una mayor colaboración entre ellas, para desarrollar estrategias que sean sostenibles no únicamente desde una perspectiva técnica, además también sea ambiental y socialmente.

Para resolver este tipo de problemáticas complejas, no solo se necesita una única perspectiva. Es por ello que es esencial promover investigaciones que mezclan diversas disciplinas, motivar a la colaboración entre los países y también garantizar que los hallazgos científicos sean implementados en la vida práctica, es decir, sean utilizadas en la toma de decisiones de la planificación de la ciudad, en los marcos normativos y en las inversiones del sector público. En relación a esto, la mezcla de soluciones tecnológicas con métodos inspirados en la naturaleza presenta una auténtica oportunidad para construir ciudades más resilientes, que puedan prever de manera anticipada los eventos climáticos extremos que se vienen experimentando actualmente.

Para ilustrar las conclusiones del análisis comparativo de una forma clara y precisa, en la tabla 1 se presentan de manera integral las diferentes estrategias aplicadas en diversas partes del

mundo para así poder adaptar los sistemas de drenaje al cambio climático. En esta tabla se comparan las técnicas utilizadas, los beneficios obtenidos, las dificultades frecuentes encontradas y el nivel de progreso en su implementación, con el fin de identificar las experiencias que puedan ser replicadas y evaluar su uso en contextos latinoamericanos. En la tabla 1 se resumen las principales estrategias regionales frente al cambio climático, destacando beneficios, limitaciones y su nivel de implementación, con el fin de reducir la vulnerabilidad en las ciudades y fortalecer su capacidad de adaptación.

Tabla 1
Estrategias regionales ante el cambio climático

Región	Estrategias predominantes	Principales beneficios observados	Limitaciones identificadas	Nivel de implementación actual
América	Aplicación de soluciones híbridas que combinan infraestructura tradicional con sistemas sostenibles (SUDS), uso de modelos como SWMM y optimización de redes existentes.	Mejora en la capacidad de almacenamiento y control del escurrimiento superficial. Promoción de prácticas resilientes adaptadas al entorno urbano.	Escasa articulación institucional, limitaciones presupuestarias y cobertura restringida a zonas piloto.	Intermedio: se han implementado soluciones localizadas con resultados positivos, pero sin una integración completa en las políticas urbanas.
Europa	Implementación de infraestructura verde, modernización normativa (curvas IDF	Mayor resiliencia de las ciudades ante eventos extremos, integración efectiva de soluciones	Costos elevados en zonas históricas, resistencia comunitaria en ciertos sectores y	Alto: las estrategias están consolidadas en varios países, con fuerte

	actualizadas), modelos predictivos avanzados y enfoque preventivo en la planificación urbana.	sostenibles con planificación urbana formal.	complejidad de intervención en tejidos urbanos consolidados.	respaldo institucional y técnico.
Asia	Combinación de infraestructuras convencionales (diques, represas) con intervenciones ecológicas y estrategias participativas; atención a zonas urbanas y rurales.	Reducción de riesgos en áreas vulnerables, adaptación a contextos complejos y promoción del involucramiento comunitario.	Falta de datos climáticos de alta resolución, infraestructuras obsoletas y dificultades en la gestión urbana.	Intermedio: algunas regiones avanzan en integración de soluciones, mientras otras mantienen enfoques reactivos.
África	Promoción de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS), jardines de lluvia, mapeo de riesgo mediante SIG, y soluciones basadas en la naturaleza.	Alternativas de bajo costo adaptadas al contexto socioeconómico local; fortalecimiento de la conciencia comunitaria.	Débil institucionalidad, escasez de recursos financieros y baja priorización política del drenaje urbano.	Bajo: en fase inicial, con pocos casos exitosos documentados y limitada escalabilidad.

Nota. Elaboración propia. Se elaboró esta tabla con la información proporcionada en el capítulo con el fin de resaltar las estrategias y limitaciones que se presentan en cada una de las regiones. Muwafu et al. (2024), Munzhedzi et al. (2024), Blakime et al. (2024), Pérez-Corredor et al. (2024), Fitobor et al. (2022), Wartalska y Kotowski (2020), Nowakowka et al. (2019), Manandhar et al. (2023), Chai et al. (2020), Pervin et al. (2020), Perumal y Sahoo (2010).

Capítulo 2. Impactos del cambio climático sobre el drenaje urbano y la infraestructura en América Latina

El cambio climático ya no es una amenaza futura, ahora se ha convertido en una realidad que afecta directamente la vida urbana. Los cambios en los patrones de lluvia, la mayor frecuencia de eventos extremos y el crecimiento acelerado en las ciudades generan desafíos importantes para el funcionamiento de los sistemas de drenaje y la infraestructura de las ciudades.

En este capítulo se analiza de forma detallada cómo el cambio climático está impactando en los sistemas de drenaje urbano. Se revisan aspectos como el comportamiento de las lluvias en América Latina, el aumento de la escorrentía, la frecuencia de las inundaciones y los efectos en la infraestructura urbana.

2.1 Cambio climático y su impacto en el ciclo hidrológico

El ciclo del agua, que regula el movimiento natural del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y los cuerpos de agua, ha experimentado alteraciones significativas en las últimas décadas. El calentamiento global, atribuido principalmente a las actividades humanas, ha alterado procesos fundamentales como la evaporación y la condensación. A medida que la temperatura del planeta sube, la capacidad del aire para retener humedad también aumenta. Milly et al. (2015) explican que por cada grado Celsius adicional, la atmósfera puede almacenar hasta

un 7 % más de vapor de agua. Esto ayuda a entender por qué las lluvias actuales son más intensas, más frecuentes e impredecibles.

En América Latina, los efectos de estos cambios no son uniformes, sino que varían de una región a otra. Por ejemplo, en el noreste argentino se ha observado un aumento de hasta el 30 % anual de lluvia desde la década de 1980. En cambio, la Patagonia ha visto una reducción considerable, relacionada con la disminución de los glaciares en los Andes. Viale et al. (2019) estudiaron estas tendencias y encontraron que los cambios en las lluvias y la disminución de la nieve acumulada han impactado directamente el caudal de los ríos cordilleranos, afectando tanto el suministro de agua para las ciudades como la generación de energía hidroeléctrica.

En Colombia, entender el patrón del agua es más complejo debido a su diversidad climática. Sin embargo, algunos estudios permiten ver señales claras. Giraldo et al. (2022), utilizando el índice HY-INT que combina la intensidad y frecuencia de las lluvias, encontraron que en varias estaciones del país se han registrado aumentos en los eventos extremos, especialmente durante episodios de El Niño y La Niña. Según sus hallazgos, en regiones como la Andina y Pacífica, algunas lluvias diarias han superado los promedios históricos. Esto representa un desafío importante, ya que los sistemas de drenaje urbano en muchas ciudades no fueron diseñados para manejar lluvias tan intensas ni tan frecuentes.

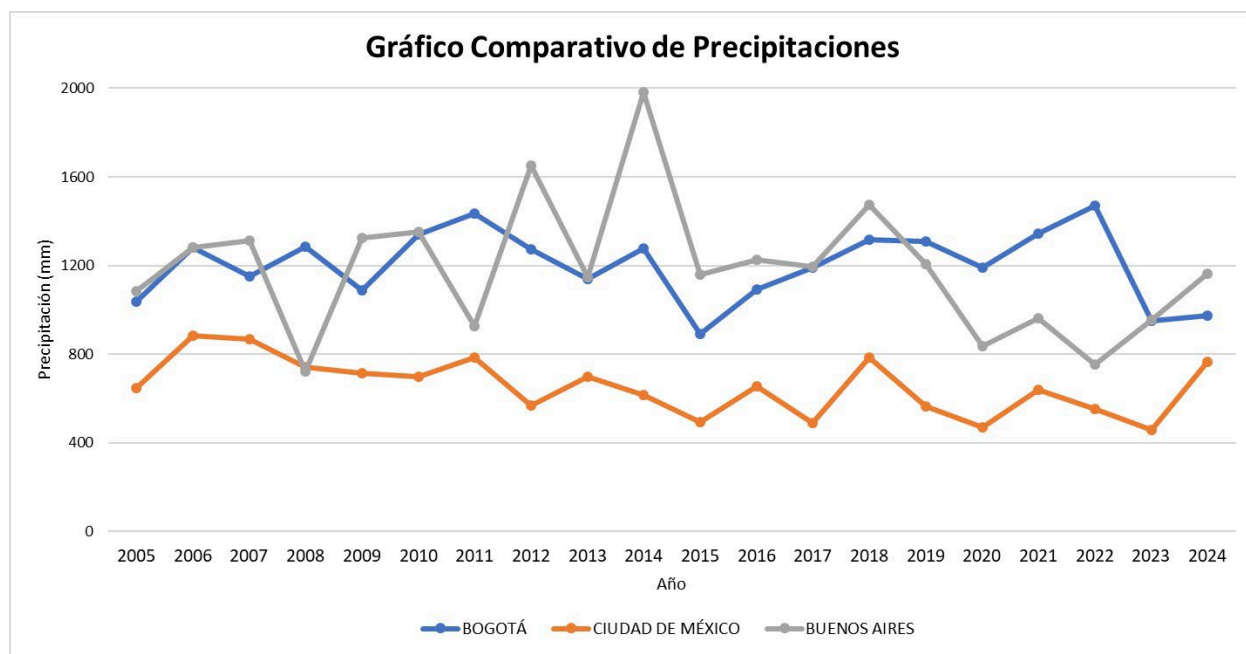
El fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur) tiene una influencia directa sobre estas alteraciones. Durante El Niño se dan condiciones más secas en el norte de Sudamérica, mientras que La Niña se asocia con lluvias excesivas. Colorado-Ruiz y Cavazos (2021) advierten que los

efectos del ENSO podrían intensificarse con el cambio climático, generando lluvias aún más intensas, sobre todo en el sur de México y Centroamérica. Esto indica que el ciclo del agua se está volviendo más extremo en ambas direcciones: sequías más severas y lluvias más intensas. Las ciudades deberán prepararse para enfrentar ambos escenarios con infraestructuras más resilientes y adaptables.

Para ilustrar esta situación, en la Figura 17 se presenta un gráfico comparativo de la precipitación anual en tres ciudades representativas: Bogotá, Ciudad de México y Buenos Aires, durante el período 2005–2024. Los resultados muestran que Ciudad de México evidencia una tendencia hacia condiciones más secas en los últimos años, mientras que Bogotá mantiene una variabilidad relativamente estable. En contraste, Buenos Aires registra los valores más altos y variables, lo que incrementa la presión sobre sus sistemas de drenaje. Estos resultados coinciden con lo señalado por Blázquez y Solman (2020), quienes identificaron un aumento de eventos de precipitación extrema en el sur de Brasil, Uruguay y el noreste de Argentina. En este contexto, Buenos Aires se perfila como una de las ciudades más susceptibles a lluvias intensas y frecuentes, lo que convierte la gestión de inundaciones en un desafío. Finalmente, al tratarse de datos oficiales del IDEAM (Colombia) y del SMN (México y Argentina), se cuenta con una base sólida y confiable para comprender la magnitud de la variabilidad climática en la región.

Figura 17

Precipitación anual en Bogotá, Ciudad de México y Buenos Aires (2005–2024)



Nota. Elaboración propia con datos de IDEAM (2025), SMN MÉXICO (2025) y IDECBA (2025)

2.2 Aumento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas

Una de las manifestaciones más visibles del cambio climático en las ciudades es el aumento de las lluvias intensas, donde antes eran poco comunes y hoy son habituales en muchas partes del mundo, incluyendo América Latina. La explicación está en la física del clima, con más calor en la atmósfera, se evapora más agua, y cuando esa humedad se condensa en las nubes, las lluvias son más fuertes.

En Colombia, ya se notan estos efectos, pues un estudio basado en el conjunto de datos CHIRPS mostró que las lluvias diarias más intensas han aumentado en varias regiones del país, sobre todo durante La Niña (Giraldo et al., 2022). En México también ocurre algo similar:

Colorado-Ruiz y Cavazos (2021) reportaron más días con lluvias por encima de los 50 mm y 100 mm en amplias zonas del centro y sur del país; sobrepasando fácilmente la capacidad de los sistemas de drenaje.

En otros lugares del continente también se observa una tendencia parecida. Blázquez et al. (2021) analizaron proyecciones climáticas del proyecto CORDEX para Sudamérica y encontraron que, si las emisiones siguen siendo altas (escenario RCP8.5), las lluvias extremas aumentarán en lugares como el noreste de Argentina, el sur de Brasil y Paraguay. El IPCC (2021) advierte que incluso en zonas donde la cantidad de lluvia total podría disminuir, los eventos extremos serán más frecuentes. Esto es especialmente preocupante en regiones como el altiplano andino, donde se concentran fuertes precipitaciones que “son atribuibles a la activación de la Alta de Bolivia (AB)” según (Garreaud, 2025), este acontecimiento es también conocido como el Anticiclón de Bolivia, pues en este lugar se presenta un sistema de alta presión que se forma en la atmósfera sobre el altiplano de Bolivia en épocas de verano, funcionando como una aspiradora gigante, que atrae y redirige el aire cálido y húmedo de la cuenca del Amazonas a la Cordillera de los Andes, cuando este aire choca con las montañas, se eleva, luego se enfría y se condensa rápidamente, creando así las nubes de tormentas que provocan las lluvias extremas.

Más allá de la evidencia científica, la población también percibe estos cambios. Muchas ciudades han experimentado tormentas que superan los registros históricos, con inundaciones, caos vial y daños en la infraestructura. En Bogotá, por ejemplo, Saldarriaga (2016) encontró que las tormentas que antes se presentaban cada diez años hoy son más frecuentes, pues según un informe de UNDRR y OCHA (2023) sobre el panorama de desastres en América Latina y el

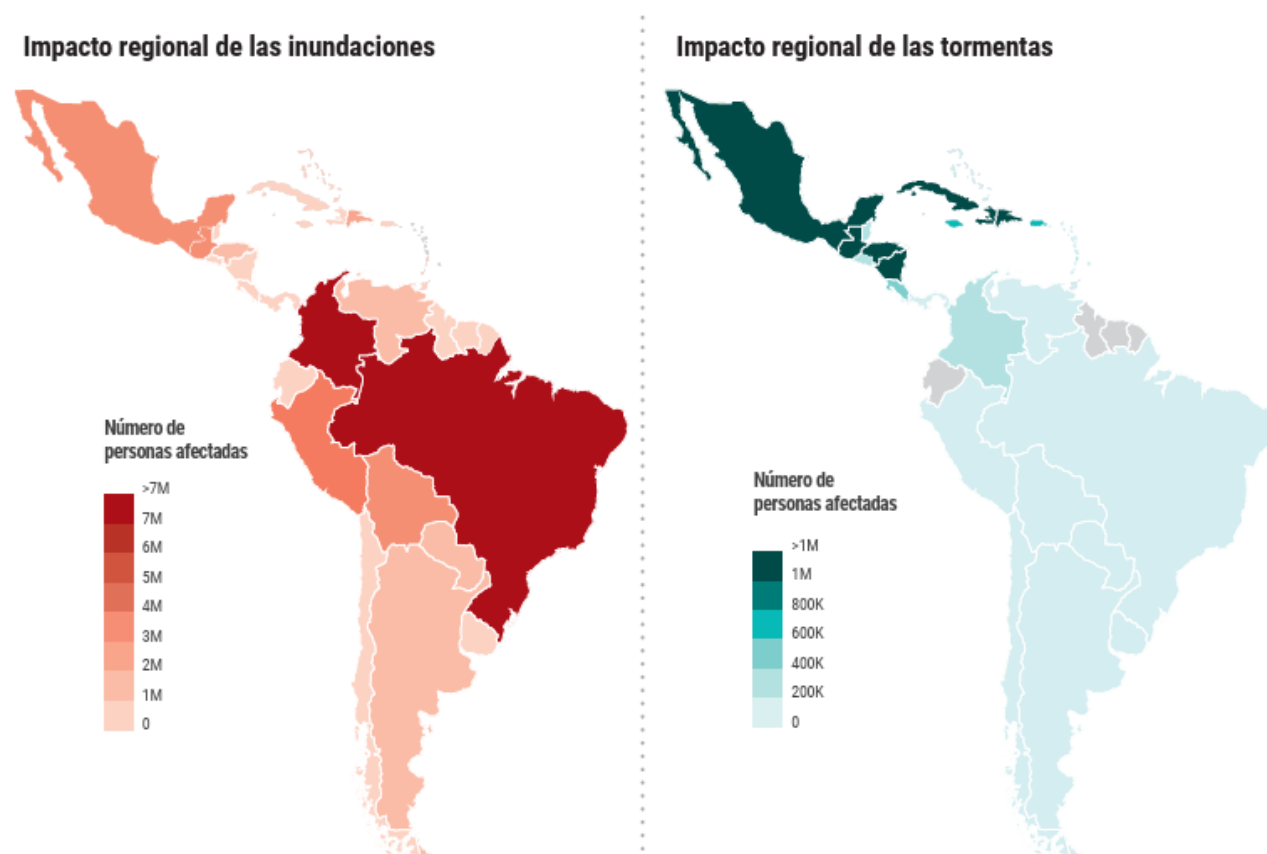
Caribe, afirma que las tormentas han incrementado un 38% entre 2019 y 2022, es decir, en tan solo 3 años incrementaron de manera significativa, lo cual fortalece la teoría de que los sistemas de drenaje existentes ya no logran evacuar el agua acumulada, porque estos fueron diseñados para condiciones muy diferentes a las que se viven a día de hoy. Este tipo de hallazgos refuerza la urgencia de actualizar el diseño de la infraestructura urbana frente a los nuevos patrones climáticos.

De acuerdo con la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) y la Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), entre 2000 y 2022 América Latina y el Caribe fueron la segunda región del mundo más propensa a desastres, con 1.534 eventos que afectaron a 190 millones de personas. De estos, 681 correspondieron a inundaciones y 400 a tormentas; el resto incluyó terremotos, sequías, deslizamientos, temperaturas extremas, incendios forestales y otros fenómenos (UNDRR & OCHA, 2023, p. 7). Por consiguiente, las inundaciones constituyen el fenómeno más común en la región y el que causa el mayor número de afectados.

La Figura 18 confirma esta situación: en Colombia y Brasil se concentran los impactos más altos por inundaciones, mientras que las tormentas afectan principalmente a México, Centroamérica y el Caribe.

Figura 18

Impacto regional de inundaciones y tormentas en América Latina (2000-2022)



Nota. Tomado de (UNDRR & OCHA, 2023, pág. 14)

La Tabla 2 presenta el registro de algunos eventos extremos de precipitación ocurridos en países de América Latina durante el período comprendido entre 2015 y 2025.

Tabla 2

Impacto de las lluvias Torrenciales en América Latina

Año	Área Afectada	Fenómeno	Daños
2015	Isla caribeña de Dominica.	La tormenta tropical Erika, empezó como una tormenta débil con vientos de tan solo 80 km/h,	20 fallecidos, 40% de la población afectada y
		pero sus precipitaciones alcanzaron niveles máximos de 304,8 mm, provocando inundaciones y deslizamientos.	pérdidas económicas de 483 millones de dólares; es decir el 90% del PIB
2016	Haití, República Dominicana, Cuba, Jamaica, Bahamas y Estados Unidos.	Huracán Matthew, la tormenta más fuerte que azotó el Caribe en 2016 y Haití el país que sufrió los mayores impactos, con vientos máximos de 260 km/h, dejando tras su paso lento sobre Haití 800 mm en precipitaciones en algunas zonas del país.	546 fallecidos, 90% de viviendas dañadas o destruidas en Grand Anse y Sur, 80% de la infraestructura eléctrica destruida y 2,1 millones de personas afectadas, además de 1,4 millones de personas que requerían asistencia humanitaria.
		Anguila, Antigua y Barbuda, Las Bahamas, Barbados, Cuba, República Dominicana, Haití, Puerto Rico, San Bartolomé, San Cristóbal y Nieves, San	
2017		Huracán Irma, pasó un total de 78 horas como categoría 5 y con vientos máximos de 290 km/h durante 37 horas, además de lluvias torrenciales en Puerto Rico de 250 a 380 mm	47 fallecidos, 10 millones de personas

	Martín (parte francesa), Sint Maarten (parte neerlandesa), las Islas Turcas y Caicos, las Islas Vírgenes de Estados Unidos y Británicas.		afectadas, entre 64 y 90 mil millones de dólares en pérdidas económicas.
		El Huracán María pasó de tormenta tropical a huracán en 48 horas, con vientos de 274 km/h, lluvias torrenciales superiores a los 500 mm en algunas zonas, causando inundaciones y deslizamientos.	143 fallecidos, 927 mil personas afectadas, carencias en los servicios básicos por meses y caminos bloqueados.
2017	Dominica, República Dominicana, Guadalupe, Haití, Martinica, Puerto Rico, las Islas Vírgenes de Estados Unidos y Británicas.		Hasta el 28 de febrero se han registrado 25 fallecidos, 27 desaparecidos, 5.200 familias afectadas, 59 viviendas destruidas y 61 municipios afectados.
2019	Chuquisaca, Potosí y La Paz en Bolivia	Fuertes lluvias y tormentas eléctricas, provocando inundaciones repentinas y deslizamientos, fue declarado como emergencia nacional con 61 municipios afectados.	
2019	Islas Ábaco y Gran Bahama	El Huracán Dorian de categoría 5, provocó vientos máximos de más de 354 km/h y una marejada	En Ábaco destruyó miles de casas, infraestructuras

		ciclónica de siete metros sobre las Bahamas.	eléctricas, carreteras, pozos de agua y dos asentamientos. Se registraron 67 fallecidos en Bahamas.
			74 fallecidos en Honduras, 60 en
		El Huracán Eta e Iota, ambos de categoría 4, Eta con vientos máximos de 240 km/h y el Iota con 250 km/h, este último fue más destructivo, llegando 2 semanas después del Eta en las mismas áreas, con	Guatemala y 2 en Nicaragua, 4.9 millones de personas afectadas y 6.800 millones de dólares en daños
2020	El salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua	Precipitaciones con 609 mm en Nicaragua, 305 mm en honduras, Guatemala y Belice	materiales causados por Eta. Estos dos huracanes afectaron a 3 millones de personas y se estimaron pérdidas en 56 municipios con 742 millones de dólares
		Lluvias intensas y prolongadas, las precipitaciones desbordaron ríos e inundaron 58 municipios, además de generar deslizamientos de tierra y piedras.	18 fallecidos, 2 desaparecidos, 286 heridos y más de 35 mil desplazados. En total 430 mil personas afectadas, además de 25
2021 a 2022	Bahia, Brasil		

		carreteras bloqueadas
		por inundaciones y
		deslizamientos
		130 fallecidos,
	Lluvias intensas causan	aproximadamente
	inundaciones y deslizamientos,	130.000 personas
	la ciudad de Recife fue una de	desplazadas, además de
2022	Pernambuco, Alagoas y	importantes pérdidas
	Paraíba en Brasil	económicas, como
	mm en precipitaciones en solo	también daños en
	unos días, superando el	viviendas e
	promedio mensual.	infraestructuras.
	Huracan Otis, tormenta de	50 fallecidos, 30
	categoría 5, con vientos de 270	personas desaparecidas,
	km/h, rompió récords regionales	en Acapulco
	por su fuerza y su velocidad de	848.647 personas
	intensidad. Causó	afectadas y 79.605 en
2023	Suroeste de México, Estado	Coyuca de Benítez,
	de Guerrero y Acapulco	además se registraron
	marejadas ciclónicas,	daños importantes en
	inundaciones, deslizamientos de	carreteras, edificios,
	tierra y daños a la infraestructura	redes eléctricas y
	en el estado de Guerrero,	telecomunicaciones.
	incluyendo un aeropuerto.	
2024	Rio Grande do Sul en Brasil	Afectó a 1.9 millones de
	experimentado precipitaciones 3	personas, 141

		veces superiores a la media del año.	desaparecidas, 756 heridas, medio millón de personas desplazadas y 81.000 viviendo en refugios. Hasta el 10 de mayor se registraron muertes que ascienden a 126.
2025	Chocó, Colombia	Inundaciones y vendavales declarados como calamidad pública	Afectó a 109.600 personas, impactó en el 76% del departamento, provocando pérdidas parciales y totales de viviendas, principalmente en zonas costeras, entre otras. Inundaciones, daños en infraestructuras e interrupciones en servicios de salud, afectando al menos a 16 municipios, confirmando 2 fallecidos y a 123.000
2025	Oaxaca y Guerrero en México	Huracán Erick de categoría 3 con vientos de 205 km/h.	

			personas sin electricidad.
		Lluvias torrenciales, causan	
		deslizamientos, inundaciones	50 fallecidos, 204.000
		que han afectado 24 provincias,	personas afectadas,
		siendo Manabí, Los Ríos,	53.800 desplazados,
2025	Ecuador	Guayas, El Oro y Esmeraldas las	daños en 69.000
		más afectadas. El gobierno	viviendas y 150 km de
		declaró en alerta roja 6	carreteras.
		provincias costeras.	

Nota. Elaboración propia. Información obtenida de (UNDRR & OCHA, 2023), (Metych, 2025), (CNN, 2018), (Organización Internacional para las Migraciones (OIM), 2016), (NASA, 2016), (Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias (ERCC), 2019), (NASA, 2021), (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2022), (Deutsche Welle, 2021), (Marengo et al., 2023), (OCHA et al., 2024), (IFRC, 2024), (OCHA, 2025)

2.3 Cambios en la escorrentía superficial y saturación del drenaje urbano

Cada vez que llueve con fuerza en una ciudad, una parte del agua corre sobre la superficie en lugar de infiltrarse en el suelo. Esto ocurre porque muchas zonas están cubiertas por cemento, asfalto o techos, materiales los cuales impiden el paso del agua. Así, el volumen que corre por las calles aumenta rápidamente, y si el sistema de drenaje no tiene la capacidad suficiente, se produce una inundación. Román (2025) reportó que, en América Latina, el número promedio de inundaciones por año pasó de 4 en los años 60 a más de 22 en la década de 2020, lo que muestra un claro aumento en esta tendencia.

Esta relación es sencilla de analizar, las lluvias más fuertes son igual a más escorrentía e igual a más presión sobre los drenajes. Serrano-Núñez et al. (2024) explican que las redes pluviales tienen un límite de agua que pueden conducir y si se supera ese límite, el agua busca otros caminos por donde evacuar siendo estos las calles, bajos o viviendas.

Para entender mejor esto es necesario conocer la definición de escorrentía: “Parte de la precipitación que fluye por la superficie del terreno hacia un curso de agua” (UNESCO & WMO, 2012), es decir, es el caudal de agua que fluye hacia los drenajes, por ende, si este caudal de escorrentía supera el caudal con el que fue diseñado dicho drenaje, se rebasa y desencadena una posible inundación. Por consiguiente, existe una fórmula conocida como el método racional, que permite calcular el caudal de escorrentía, la cual es la siguiente:

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

Donde:

- Q es el caudal de escorrentía (m³/s),
- C es el coeficiente de escorrentía (adimensional),
- i es la intensidad de precipitación (mm/h),
- A es el área de drenaje (ha).

Como lo explican Chow, Maidment y Mays (1988), este método permite estimar el agua generada en una tormenta. Superficies impermeables como el asfalto tienen valores altos, porque

casi toda el agua corre en superficie, en cambio, los suelos con vegetación permiten más infiltración.

Cuando las lluvias son intensas y el suelo no absorbe el agua, los sistemas colapsan. Vorobevskii et al. (2020) señalan que, en muchos lugares, se espera un aumento del 10 % al 35 % en la intensidad de las lluvias de diseño hacia finales del siglo XXI. Esto implica que una tormenta “normal” del pasado será superada con facilidad en el futuro.

Pero no solo el clima es el que agrava el problema. Las ciudades de América Latina han crecido notoriamente, aunque en comparación a años anteriores se ha ralentizado el crecimiento en algunos países como se observa en la tabla 3; en la mayoría de los casos, este crecimiento elevado no ha tenido una planeación adecuada, llevando a impermeabilizar grandes superficies, a ocupar antiguos cauces naturales y a no invertir lo suficiente para actualizar los sistemas de drenaje (Volpi-León et al., 2024). Todo esto genera una escorrentía que no tiene una ruta de salida, terminando en inundaciones, daños estructurales y contaminación del agua al arrastrar residuos.

Tabla 3

Cuadro comparativo del % de crecimiento en la población urbana del año 2002 y 2022 en países de América latina y Caribe.

Población Urbana		
País	% crecimiento	
	2002	2022

Antigua y Barbuda	-0.8	0.4
Argentina	1.3	0.3
Las Bahamas	1.2	0.4
Barbados	0.1	0.3
Belice	3.0	2.3
Bolivia	2.4	1.7
Brasil	1.6	0.6
Chile	1.4	0.6
Colombia	2.1	1.4
Costa Rica	3.9	1.2
Cuba	0.6	-0.4
Dominica	0.6	-0.1
República dominicana	2.8	1.7
Ecuador	2.3	1.1
El Salvador	1.2	1.3
Granada	0.4	0.7
Guatemala	3.0	2.2
Guyana	-0.4	1.2
Haití	6.2	2.6
Honduras	4.0	2.7
Jamaica	1.0	0.7
Nicaragua	1.5	1.8
Panamá	2.4	1.8

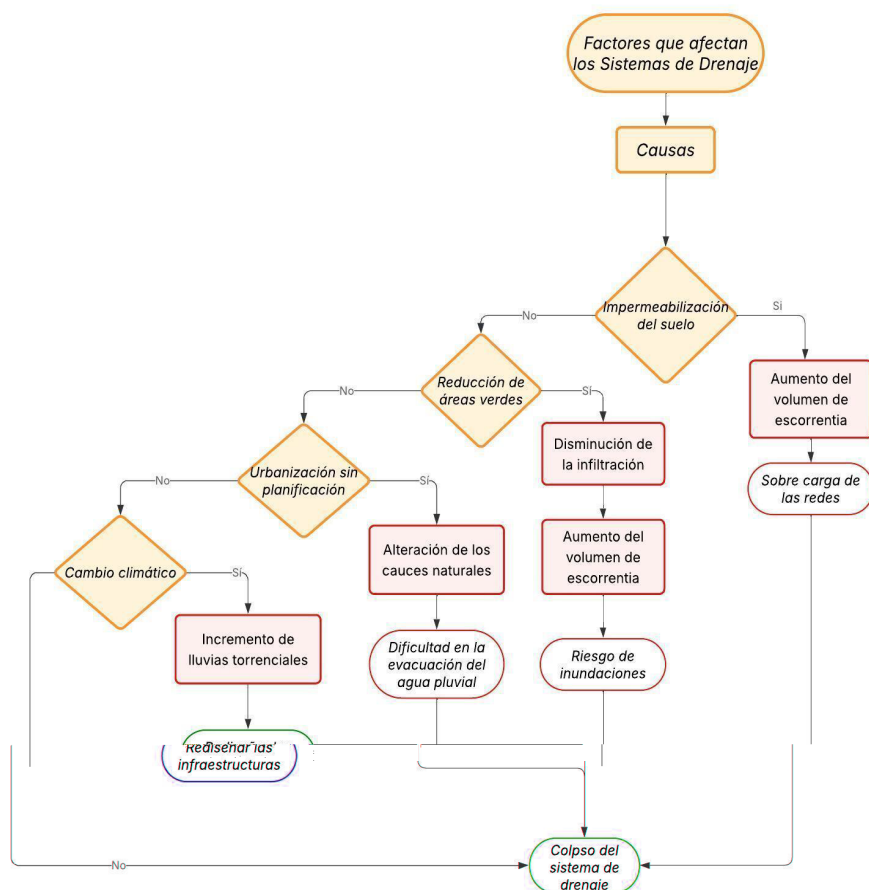
Paraguay	2.5	1.6
Perú	1.7	1.2
Puerto Rico	0.1	-1.3
San Cristóbal y Nieves	0.1	0.2
Santa Lucía	-3.4	0.7
San Vicente y las granadinas	0.7	0.0
Surinam	2.1	1.0
Trinidad y Tobago	0.1	0.0
Uruguay	0.4	-0.1
Venezuela	1.8	0.0
Latino América y Caribe	1.8	0.9
Mundo	2.4	1.7

Nota. Información tomada de (Grupo Banco Mundial, 2025)

Por ende, es importante entender que la interacción entre el agua y la ciudad ayuda a planificar mejor, pues los drenajes urbanos tienen un límite, y es normal que no puedan captar el 100 % del agua de una tormenta extrema. Para comprender con más detalle esta situación en la figura 19 se puede observar un diagrama de flujo, el cual muestra a detalle las diferentes causas que afectan los sistemas de drenaje porque no tienen la capacidad de soportar en su totalidad la escorrentía superficial de los diferentes fenómenos naturales. Como lo explican Merlinski y Tobías (2016) que siempre puede existir un evento fuera de lo previsto.

Figura 19

Diagrama de flujo de las causa-efecto de la escorrentía urbana.



Nota. Elaboración propia. En base a la información de la tabla 3 se elaboró este diagrama con la herramienta Lucid, con el fin de visualizar de manera clara se observan 3 colores, el naranja es indica los efectos y causas que afectan los sistemas de drenaje, el rojo los problemas e impactos que sufren y por último con verde están las soluciones o medidas correctivas para mitigar dichos problemas.

Los casos recientes lo confirman, en marzo de 2025, la ciudad argentina de Bahía Blanca recibió más de 400 mm en solo ocho horas, equivalente a toda la lluvia de un año. El sistema de drenaje colapsó y hubo graves inundaciones, con víctimas fatales y pérdidas importantes (Osman et al., 2025). En febrero de 2022, algo similar ocurrió en Petrópolis, Brasil, con lluvias tan intensas que causaron aludes e inundaciones mortales (Organización Meteorológica Mundial, 2022).

En Colombia, también se han registrado eventos de saturación. En Bogotá, la reducción de humedales disminuyó la capacidad de absorción natural, afectando zonas como Suba y Engativá. Strategic Risk Global (2023) recomienda recuperar estos ecosistemas para mitigar los impactos. En Medellín, debido a su geografía de laderas, la escorrentía superficial es aún mayor; no obstante, medidas como la protección de quebradas y el uso de infraestructura verde han mostrado buenos resultados.

Estos ejemplos evidencian que el problema no es aislado, sino estructural. Muchas ciudades enfrentan lluvias más intensas y frecuentes mientras sus sistemas hidráulicos permanecen obsoletos. Es urgente adecuar infraestructuras, actualizar normativas y avanzar hacia soluciones integrales. Una de las más relevantes es la revisión de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), que relacionan la magnitud y recurrencia de las lluvias y sirven de base para el diseño de drenajes. Song et al. (2025) sugieren ajustarlas a las nuevas condiciones climáticas, lo que facilita el rediseño de tuberías, canales y sumideros. Asimismo, se promueve el uso de alternativas como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que permiten controlar el agua desde su origen y mejorar la resiliencia urbana.

Las inundaciones urbanas son uno de los riesgos climáticos más graves de América Latina. En los últimos 20 años, se han registrado más de 200 episodios severos, con más de 10.000 fallecidos y millones de desplazados (CRED-USAID, 2023). Su aumento responde a la interacción de varios factores: crecimiento urbano sin control, colapso de los sistemas de drenaje y ocupación de zonas vulnerables, todo amplificado por el cambio climático.

2.4 Inundaciones urbanas: Factores relacionados con el cambio climático.

Las inundaciones urbanas se han convertido en uno de los riesgos climáticos más serios en América Latina. En los últimos 20 años, se han registrado más de 200 episodios importantes, dejando más de 10.000 fallecidos y millones de personas desplazadas (CRED - USAID, 2023). Estos eventos no solo son más frecuentes, sino también cada vez más destructivos, esto es en parte porque se suman factores como el crecimiento urbano sin control, el colapso de los sistemas de drenaje y la ocupación de zonas vulnerables como laderas o riberas de ríos. El cambio climático amplifica estas condiciones y hace que estos los impactos sean cada vez más graves.

En muchas ciudades, el desarrollo urbano ha reducido las zonas verdes y endurecido el suelo con concreto y asfalto, disminuyendo la capacidad natural de absorción. En Santiago de Chile, por ejemplo, el avance urbano ha reducido la permeabilidad del suelo, incrementando el riesgo de inundaciones y generando impactos económicos y sociales notables (Heinrichs et al., 2010).

En ciudades costeras como Cartagena de Indias (Colombia), el riesgo es mayor, pues a las lluvias intensas se suma el aumento del nivel del mar. Esto ha incrementado la frecuencia de inundaciones en hospitales, escuelas y barrios residenciales, afectando especialmente a comunidades vulnerables (Rojas et al., 2013).

Los efectos de las inundaciones se manifiestan de múltiples formas; están los impactos directos, como lo son daños a viviendas, puentes y carreteras; y los indirectos, como la interrupción de clases, afectaciones a la salud pública o pérdidas económicas prolongadas. La CEPAL (2022) resalta que las poblaciones en condición de pobreza son las más expuestas, ya que muchas veces viven en zonas de alto riesgo y no cuentan con los servicios básicos adecuados. Esto profundiza las desigualdades frente a los efectos del cambio climático en el entorno urbano.

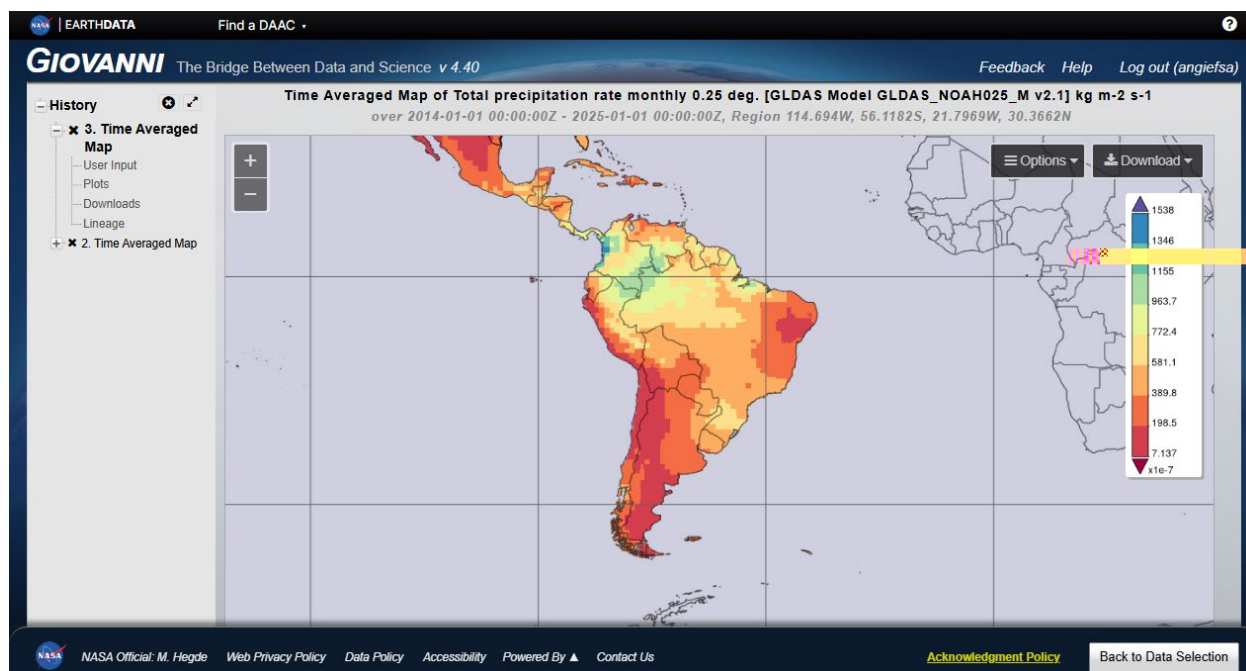
En el caso del fenómeno de El Niño se intensifican aún más estos riesgos. Un ejemplo claro es lo ocurrido en Perú durante 2017, cuando ciudades como Lima y Piura enfrentaron lluvias de tal magnitud que colapsaron la infraestructura urbana. Hubo cortes de servicios, destrucción de viviendas y miles de desplazados (French et al., 2020). Además de los efectos físicos, esta situación dejó en evidencia que muchas ciudades carecen de planes eficaces para responder a emergencias de este tipo. Frente a esta problemática, han surgido soluciones que prioriza la sostenibilidad, un buen ejemplo son los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). En San Luis Potosí, México, se han implementado estrategias como jardines de lluvia, pavimentos permeables y humedales artificiales, lo cual según Zubelzu et al. (2020), estas intervenciones han reducido el riesgo de inundaciones y también han mejorado el entorno urbano, al hacerlo más verde y funcional.

La Figura 20 presenta la distribución promedio de la precipitación mensual en América Latina durante el período 2014–2024. Se observan altos niveles de lluvia en Colombia, el sur de Venezuela, el norte de Brasil y la Amazonía peruana, zonas donde la gestión del drenaje es

crucial para reducir el riesgo de inundaciones. En contraste, regiones como el norte de México, el noreste de Brasil, y el centro y sur de Perú, Chile y Argentina muestran valores bajos, lo que las hace más vulnerables a sequías. Esta variabilidad regional demuestra la necesidad de estrategias diferenciadas como por ejemplo infraestructura de control pluvial en áreas húmedas y medidas de almacenamiento y uso eficiente del agua en zonas secas.

Figura 20

Mapa de la tasa promedio de precipitación mensual en Latinoamérica.



Nota. Imagen generada con la herramienta Giovanni (NASA, 2025) utilizando el modelo GLDAS_NOAH025_M v2.1 para el periodo comprendido entre enero de 2014 a diciembre de 2024.

A pesar de los avances en algunas ciudades, la región aún enfrenta grandes desafíos. Muchas ciudades no cuentan con recursos suficientes, ni con políticas claras ni con la coordinación institucional necesaria para implementar soluciones, limitando la capacidad de actuar ante fenómenos climáticos extremos. Como lo advierte el IPCC (2022), solo mediante decisiones basadas en evidencia científica, inversiones adecuadas y participación activa de la ciudadanía, será posible construir ciudades verdaderamente resilientes.

Se necesita una nueva visión en la política pública. Esta debe incluir la restauración de ecosistemas que ayudan a regular el agua, la actualización de redes de drenaje, el acceso a

información climática confiable y el fomentar la cultura de prevención. En otras palabras, las ciudades no solo deben reaccionar a las inundaciones, sino anticiparse y prepararse para ellas.

2.5 Modelado y previsión del impacto del cambio climático en las redes de drenaje urbano.

Ante un escenario de precipitaciones más fuertes e impredecibles, es fundamental comprender el funcionamiento del sistema de drenaje urbano, para lograr este objetivo, la simulación hidráulica e hidrológica se ha vuelto una herramienta fundamental. Dado que estas herramientas posibilitan la simulación de diversos escenarios climáticos, la evaluación del rendimiento de los sistemas actuales y la planificación de mejoras que disminuyan los impactos futuros.

Dos de los modelos más utilizados en este campo son SWMM y HEC-HMS. En el caso del modelo SWMM (Storm Water Management Model) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, se centra en simular el comportamiento del agua de lluvia en áreas urbanas, considerando variables como el uso del suelo, la topografía y la intensidad de la lluvia (EPA, 2025). El modelo SWMM cuenta con las siguientes funciones:

- **Modelado hidráulico:** El SWMM ofrece gran variedad de herramientas para modelar las redes de drenaje urbano de cualquier tamaño y complejidad, incluye tuberías, canales y estructuras hidráulicas; simulando diferentes parámetros de flujos, en condiciones normales o con sobrecarga, permitiendo también definir reglas que ayuden a optimizar el funcionamiento de los sistemas (EPA, 2025). Esta característica es clave, porque ayuda a anticipar inundaciones urbanas,

evaluar la capacidad de respuesta de la infraestructura y a tomar decisiones de diseños que reduzcan dichos riesgos en eventos extremos.

- ***Contabilización de procesos hidrológicos:*** SWMM simula el proceso hidrológico o fenómenos claves que generan escorrentía en zonas urbanas, desde la lluvia, la evaporación o la infiltración, hasta la interacción con aguas subterráneas y el flujo superficial (EPA, 2025). En un estudio donde se realizó un monitoreo durante 4 años se encontró que en un jardín de lluvia tipo césped-arena, entró un volumen total de agua de lluvia de 1643 cm, donde el 85% del volumen se infiltró y el resto se evapotranspiró; es decir, no hubo escorrentía superficial. Para este caso el modelo SWMM predijo un valor de infiltración del 91%, siendo un valor ligeramente sobreestimado, pues el modelo asumió la pendiente mínima normativa para el área tributaria y por ende dió como resultado una mayor escorrentía y a su vez mayor infiltración de agua que en caso real (McCutcheon & Wride, 2013). El resultado confirma que el SWMM es capaz de representar con una buena precisión el comportamiento de infiltración de un SUDS, según lo realista que sean los parámetros. Su importancia radica en que estas simulaciones ayudan a diseñar y a validar su funcionamiento.
- ***Estimación de la carga contaminante:*** El SWMM permite calcular cómo la escorrentía arrastra contaminantes y cómo actúan con la lluvia o en aguas residuales, además de analizar cómo influye el manejo y la limpieza de calles o el uso de infraestructuras verdes en los sistemas, con el objetivo de analizar la capacidad de los sistemas de drenaje y así disminuir las cargas antes que lleguen a los ríos, mejorando la calidad del agua en las ciudades (EPA, 2025). Este aspecto

resulta vital, pues la contaminación es una de las principales amenazas para los cuerpos de agua urbanos, al controlar estos parámetros se pueden planear estrategias, mejorar la salud ambiental y garantizar el uso seguro del agua.

Un caso práctico que muestra el uso de este modelo se dio en India. Investigadores del Instituto Nacional de Tecnología de Warangal utilizaron SWMM para analizar la respuesta del drenaje de su campus, identificando zonas críticas donde agua se acumulaba con facilidad y así propusieron ajustes que mejoran el sistema y redujeron el riesgo de inundación (Rangari et al., 2018).

Por otra parte, el modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) creado por el Cuerpo de Ingenieros de EE. UU., está orientado al estudio o simulación de los procesos del ciclo hidrológico a escala de cuencas hidrográficas, como el análisis de inundaciones, gestión de recursos hídricos y demás estudios a gran escala (Moreno, 2016). Sin embargo, algunos aspectos clave de la funcionalidad de HEC-HMS en entornos urbanos incluyen:

- ***Modelado a nivel de cuenca:*** El HEC-HMS modela los procesos hidrológicos a escala de cuenca, paso fundamental para entender cómo los cambios en la cuenca (urbanización en una zona) pueden afectar el comportamiento del agua en diferentes zonas (Yu & Zhang, 2023).
- ***Integración de datos urbanos:*** Incorpora los datos específicos en los entornos urbanos, como la cobertura de suelo, sistemas de drenaje, impermeabilidad, etc.

para así poder tener mayor presión y realidad en los procesos de escorrentía y flujo en las cuencas urbanizadas (Yu & Zhang, 2023).

- ***Evaluación del impacto de la urbanización:*** Compara los resultados de las simulaciones antes y después de la urbanización, ayudando así a poder cuantificar como los cambios del uso del suelo afectan los picos de caudal, volúmenes de escorrentía y demás parámetros importantes para la gestión de inundaciones (Yu & Zhang, 2023).
- ***Planificación y diseño urbano:*** Los resultados obtenidos con las simulaciones informan sobre la planificación, el diseño de las infraestructuras de drenaje, estrategias para la reducción de inundaciones y demás estrategias para la gestión del agua en zonas urbanas (Yu & Zhang, 2023).

Estos modelos además de servir para evaluar las redes tradicionales, incorporan y analizan soluciones basadas en la naturaleza, como lo son los Sistemas de Drenaje Sostenible (SUDS), como jardines de lluvia, pavimentos permeables, zanjas de infiltración o techos verdes. A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las principales características de ambos modelos:

Tabla 4

Cuadro comparativo de los modelos SWMM y HEC-HMS

Característica	SWMM	HEC-HMS
Enfoque principal	Modelación de escorrentía urbana y redes de alcantarillado	Modelación hidrológica de cuencas y eventos de crecida
Desarrollado por	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA)	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (USACE)
Aplicaciones típicas	Diseño y análisis de sistemas de drenaje urbano, evaluación de LID	Estimación de caudales, análisis de eventos de lluvia, gestión de cuencas
Integración con GIS	Alta, especialmente con ArcGIS	Alta, mediante HEC-GeoHMS
Simulación continua	Sí	Sí
Interfaz de usuario	Gráfica e interactiva	Gráfica, con integración de datos espaciales
Disponibilidad	Gratuito	Gratuito

Nota. Realizado a partir de la información de (Moreno, 2016) y (Rangari et al., 2018).

Los efectos del cambio climático ya se sienten en las infraestructuras de América Latina. Las lluvias intensas y los eventos extremos han causado daños en puentes, carreteras, redes de agua y edificaciones. En México, por ejemplo, se han documentado casos en los que tormentas recientes han afectado la movilidad urbana y dañado obras hidráulicas esenciales (Paredes-Tavares et al., 2018). En estos casos el uso de SWMM o HEC-HMS habrían prevenido a las zonas con riesgo elevado del colapso en los sistemas de drenaje y estimar los picos del caudal para así dimensionar estrategias.

En ciudades andinas como La Paz, Bolivia, el riesgo de deslizamientos ha aumentado por lluvias más fuertes, pendientes pronunciadas y crecimiento urbano desordenado generando un escenario riesgoso. Humerez y Zeballos (2024) señalan que la falta de control urbano y la debilidad institucional agravan esta vulnerabilidad. Modelos como el HEC-HMS evaluaría los caudales de escurrimiento en quebradas y el modelo SWMM ayudaría a dimensionar SUDS como zanjas de infiltración o pavimentos permeables.

Las ciudades costeras también enfrentan amenazas crecientes. En Veracruz, México, las recientes tormentas tropicales han superado la capacidad de los sistemas básicos como el alcantarillado y el suministro de agua, afectando no solo la infraestructura, sino también la salud pública y la economía local (Paredes-Tavares et al., 2018). Un ejemplo para el caso anterior es el artículo de Valencia Ventura y Guevara Pérez, (2014) llamado “Validación del modelo HEC HMS en la cuenca del río Cabriales para el análisis hidrológico”, donde en el expresan que dicho estudio se llevará a cabo con los registros de tormentas ocurridos en los años 1971, 1986 y 2008, que ocasionaron inundaciones, destrucción de áreas y de infraestructuras urbanas en la ciudad de Valencia en Venezuela. Este estudio muestra que el HEC-HMS caracteriza adecuadamente los hidrogramas de tormentas históricas usadas, recomendando el uso de esta estructura hidrológica para estimaciones futuras de caudales máximos (Valencia Ventura & Guevara Pérez, 2014).

Estos casos muestran que el cambio climático está empujando al límite sistemas que ya eran frágiles. Para enfrentar estos retos causados por el cambio climático, es fundamental asignar recursos a soluciones naturales, técnicas y sociales. Abarcando así desde la modernización de las

curvas IDF hasta la adopción de SUDS y la optimización en la gestión territorial; cada avance es significativo.

Las situaciones provenientes del cambio climático han revelado las deficiencias de los sistemas actuales de drenaje urbano en América Latina. Las inundaciones habituales, el incremento de precipitaciones, el desbordamiento incontrolado de las aguas superficiales y el deterioro de las infraestructuras constituyen una situación que impacta a millones de personas anualmente. Este tipo de eventos no solo reflejan la falta de preparación en las entidades y en las normativas para lidiar con condiciones climáticas que son más comunes y severas, sino que además representan un riesgo inmediato.

Las ciudades a nivel mundial deben adaptar sus sistemas de drenaje para estar preparadas ante los retos que surgirán en el futuro y así mismo, puedan gestionar de manera más efectiva los efectos del clima actual. Por lo tanto, la modificación en los sistemas no es simplemente una opción, sino una exigencia apremiante. La adaptación en los sistemas debe incluir aspectos sociales, normativos, técnicos y ecológicos, dirigidos hacia un único propósito, el cual es construir ciudades más resistentes y sostenibles.

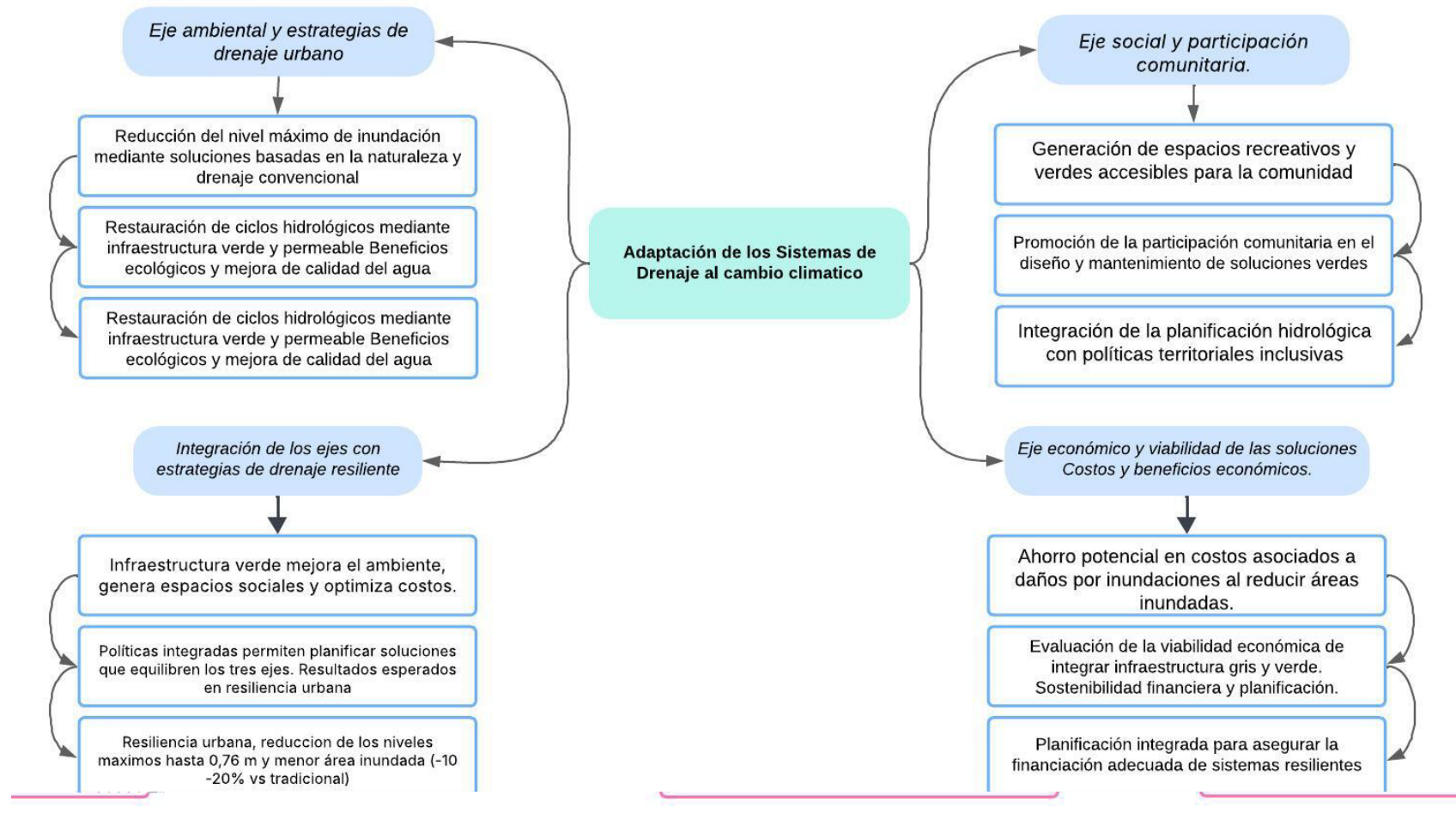
En el siguiente capítulo se resaltan los enfoques más novedosos, las técnicas que mejoran la capacidad de respuesta de las zonas urbanas y las alternativas fundamentadas en la naturaleza. Dando como resultado un capítulo que muestra el análisis de las principales estrategias a adoptar en los sistemas de drenaje urbano frente al cambio climático.

Capítulo 3. Estrategias de adaptación de los sistemas de drenaje frente al cambio

La adaptación de los sistemas de drenaje urbano ante el cambio climático se ha vuelto una prioridad para las ciudades que enfrentan precipitaciones cada vez más frecuentes e intensas. Sin embargo, no basta únicamente con fortalecer la infraestructura tradicional o “gris”; es fundamental integrar soluciones que utilicen procesos naturales, fomenten la participación de la comunidad y resulten económicamente viables. Así lo demuestra el estudio realizado por Radu et al. (2025) en Bucarest, donde se comprobó que una combinación entre drenaje convencional y soluciones basadas en la naturaleza puede reducir hasta en 0,76 metros el nivel máximo de inundación durante eventos extremos.

A su vez, estos autores evidencian que los sistemas tradicionales, por sí solos, apenas logran disminuir el área inundada en un rango de 10 a 20 %. En cambio, al incorporar infraestructura verde y materiales permeables, se multiplican los beneficios: se restauran los ciclos hidrológicos y se generan co-beneficios tanto ambientales como sociales.

Implementar infraestructura verde no solo ayuda a reducir la escorrentía superficial, sino que también mejora la calidad del agua y promueve la biodiversidad en entornos urbanos. Según Liu et al. (2014), la instalación de jardines de lluvia y pavimentos permeables logra reducir más del 50 % de contaminantes como nutrientes y sedimentos, al tiempo que transforma estos espacios en zonas recreativas para la comunidad. Por su parte, Fletcher et al. (2014) destacan la importancia de integrar la planificación hidrológica con políticas de ordenamiento territorial y modelos de gobernanza participativos para fortalecer la resiliencia urbana frente a eventos extremos.

Figura 21*Estrategias de adaptación de los sistemas de drenaje urbano**Nota.* Elaboración propia.

3.1 Clasificación de estrategias de adaptación

En la presente monografía la adaptación se define como el conjunto de medidas que preparan los sistemas de drenaje para condiciones hidrometeorológicas más extremas, y las medidas para reducir la exposición y la vulnerabilidad urbana. La literatura consigna las medidas necesarias para la adaptación en cinco tipologías; las técnicas o de infraestructura gris (canalización, ampliación de redes, bombeos, tanques/túneles); las sostenibles o basadas en la naturaleza (SBN/SUDS), como jardines de lluvia, pavimentos permeables, techos verdes, humedales; las de enfoques integrados (IUWM/WSUD y planeación por cuenca, integración pluvial-residual y ordenamiento del suelo; las innovadoras por tecnología inteligente (IoT, SCADA, gemelos digitales, alerta temprana); y por último las comunitarias y de gobernanza (ciencia ciudadana, educación, equidad territorial). Para llevar a cabo la comparación se hacen servir criterios de efectividad hidrológica, coste del ciclo de vida, co-beneficios ambientales y sociales, escalabilidad y equidad.

3.1.1 Estrategias técnicas o de infraestructura gris

Estas estrategias incluyen recalibración y rediseño hidráulico, las cuales incluyen curvas IDF, secciones o pendientes. Así mismo, también se tienen canalización, ampliación de colectores, estaciones de bombeo pluvial y túneles o tanques de almacenamiento para laminar caudal crítico. La fortaleza que representan este tipo de estrategias, es la capacidad inmediata de conducción y protección; pero sus límites si no se diseñan con flexibilidad, afecta el costo y la rigidez (Reyes, et.al, 2020).

3.1.2 Estrategias sostenibles o basadas en la naturaleza

Actúan en la zona donde fluye la lluvia: jardines de lluvia, bioceldas, zanjas de infiltración, pavimentos de infiltración, techos y muros verdes, humedales construidos y corredores azul-verdes. Presentan ventajas como disminuir picos de caudales, reducir volúmenes, mejorar la calidad del agua y generar beneficios en el barrio (sombra, biodiversidad, espacio público). Implican diseño en función del contexto en el que se implanten y requieren un plan serio de mantenimiento (Fletcher, et.al, 2015).

3.1.3 Enfoques integrados

Conjuntamente miran el agua: el drenaje, el acueducto, el alcantarillado, la calidad del agua y el uso del suelo. Realizan combinaciones de soluciones grises, verdes y azules a diferentes escalas (lote-barrio-ciudad-cuenca) apoyándose en los instrumentos de planeación (POT y planes sectoriales). Necesitan coordinación entre entidades y reglas claras de financiación (Hoban, 2019).

3.1.4 Estrategias innovadoras con tecnología inteligente

Utilizan sensores de lluvia, de nivel, de caudal, control en tiempo real de compuertas, SCADA, modelos y gemelos digitales, y alertas tempranas. Permiten sacar mejor partido de lo

que ya existe, optimizar el funcionamiento de tanques y redes, y anticipar decisiones. Necesitan tener datos fiables, protocolos de seguridad y personal cualificado (Pedersen, 2022).

3.1.5 Estrategias comunitarias y de gobernanza adaptativa

En este tipo de estrategias se involucra a la ciudadanía mediante ciencia ciudadana, formación y simulacros, y criterios de equidad territorial para priorizar los sectores más vulnerables. Refinan la legitimidad, el cuidado y la respuesta ante episodios (Verbeiren, et al, 2018).

3.2 Estrategias técnico-estructurales o de infraestructura gris

La actualización de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) se vuelve crucial para anticipar caudales máximos futuros con mayor precisión. El IPCC (2014) advierte que las lluvias extremas podrían aumentar regionalmente entre un 10 % y un 30 % hacia finales del siglo XXI. Por ello, ya no es válido confiar únicamente en las curvas IDF históricas; estas deben ajustarse tomando como base los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, especialmente para intervalos críticos de 1 hora y 24 horas.

Este reajuste se logra integrando datos pluviométricos locales con técnicas de downscaling estadístico, lo cual garantiza que el diseño de tuberías, sumideros y demás componentes del sistema hidráulico esté preparado para enfrentar condiciones más severas.

Como el comportamiento de las precipitaciones ha dejado de ser estacionario, también es necesario replantear los períodos de retorno usados tradicionalmente. Kundzewicz et al. (2014) señalan que eventos que antes se consideraban excepcionales, como las lluvias “cada 100 años”, podrían repetirse ahora cada 30 o 60 años debido a los efectos localizados del cambio climático. Ajustar las normas de diseño a estos nuevos umbrales evita tanto el sobredimensionamiento innecesario como el riesgo de infraestructuras insuficientes frente a crecidas más frecuentes.

Para mejorar la capacidad hidráulica, una de las estrategias más eficaces es aumentar el diámetro de tuberías y sumideros. Sharma et al. (2022), tras revisar múltiples estudios de caso en ciudades de Europa y América, concluyen que ampliar los diámetros entre un 30 % y un 50 % puede reducir el riesgo de desbordes hasta en un 65 %, especialmente cuando se implementan diseños modulares y prefabricados que facilitan tanto la instalación como el mantenimiento posterior.

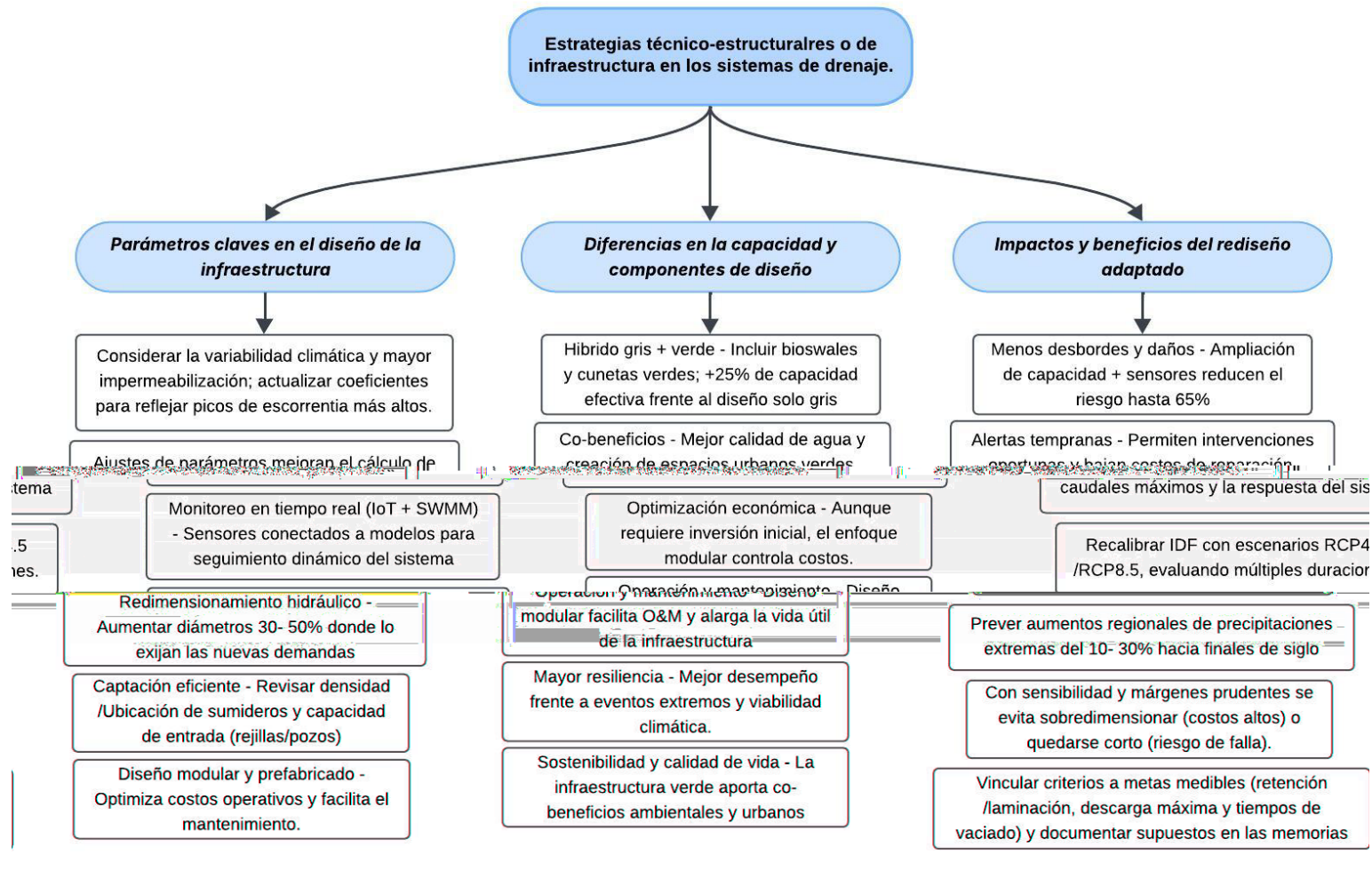
La gestión del riesgo por desbordamientos se fortalece considerablemente al integrar sensores en tiempo real y modelos de simulación. Por ejemplo, Khedo (2013) desplegó una red de sensores IoT conectada al modelo SWMM en una ciudad del sudeste asiático, mejorando la identificación de puntos críticos en un 35 % respecto a las evaluaciones tradicionales. Esta sinergia entre monitoreo activo y simulaciones dinámicas permite generar alertas tempranas y tomar decisiones preventivas que minimizan daños y costos de reparación.

Es posible afirmar entonces que el rediseño técnico e hidráulico alcanza su mayor efectividad cuando se combina con soluciones basadas en la naturaleza. Así lo demuestra el caso

de Bucarest analizado por Radu et al. (2025), donde al integrar bioswales y cunetas verdes a una red gris optimizada, se logró incrementar en un 25 % la capacidad efectiva de drenaje, junto con beneficios adicionales en calidad de agua y espacios verdes urbanos.

Figura 22

Estrategias técnico-estructurales o de infraestructura de los sistemas de drenaje



Nota. Elaboración propia.

Aparte de la modernización del diseño hidráulico, el portafolio gris contempla canalizar tramos concretos, agrandar colectores o edificar by-pass, habilitar bombas pluviales y levantar túneles o tanques que acumulen temporalmente el agua para disminuir los picos de caudales y aminorar la vulnerabilidad de las zonas más expuestas.

3.3 Estrategias sostenibles basadas en la naturaleza (SBN)

Incorporar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) permite replicar los procesos hidrológicos naturales dentro de las ciudades, lo cual reduce notablemente la escorrentía superficial y mejora la calidad del agua. Según Fletcher et al. (2015), técnicas como jardines de lluvia, pavimentos permeables y zanjas de infiltración tienen la capacidad de retener entre el 40 % y el 90 % del agua de lluvia, disminuyendo la carga sobre los sistemas tradicionales y filtrando contaminantes mediante procesos físicos y biológicos.

Los jardines de lluvia consisten en pequeñas depresiones ajardinadas que almacenan el agua pluvial y la filtran a través del suelo vegetado. Ahiablame et al. (2012) documentaron que este tipo de infraestructura puede retener hasta un 60 % del volumen de agua durante eventos moderados, y al mismo tiempo eliminar nutrientes y metales pesados gracias a la acción conjunta del sustrato y la vegetación. Además, estos espacios mejoran la estética urbana y aportan confort térmico, especialmente en zonas densamente edificadas.

Los pavimentos permeables, por su parte, son superficies porosas instaladas sobre un lecho de grava que permite la infiltración directa del agua. Según Demuzere et al. (2014), este

tipo de solución puede reducir la escorrentía entre un 50 % y un 80 % en cuencas piloto, al mismo tiempo que recarga los acuíferos subterráneos y disminuye la temperatura superficial. Su vida útil es comparable a la de pavimentos rígidos, y su mantenimiento se ve facilitado por una menor acumulación de residuos en los poros.

La recuperación de humedales urbanos también representa una estrategia eficaz para retener y tratar de forma natural grandes volúmenes de agua. Stefanakis (2019) destaca que un humedal diseñado adecuadamente puede almacenar volúmenes entre cinco y diez veces superiores a su superficie durante lluvias intensas, mientras ofrece hábitat para la fauna y flora local. Estos ecosistemas actúan como amortiguadores de inundaciones, filtran nutrientes y proporcionan áreas recreativas a la población.

Los techos verdes integran un sustrato vegetal sobre estructuras impermeables y son capaces de retener entre un 30 % y un 80 % del agua de lluvia anual (Berndtsson, 2010). Más allá de la gestión del agua, estos sistemas ayudan a mitigar el efecto de isla de calor urbana, mejoran la eficiencia energética de los edificios y prolongan la vida útil de las cubiertas al protegerlas de la radiación solar. Son especialmente eficaces en construcciones públicas o residenciales, y generan beneficios tanto sociales como ambientales.

3.4 Estrategias de enfoques integrados

3.4.1 Planificación del drenaje urbano con enfoque de cuenca

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) propone utilizar la cuenca como unidad básica de planificación, integrando la captación de agua lluvia, el alcantarillado y el tratamiento de aguas residuales. Esta perspectiva busca optimizar recursos y evitar duplicidad en las intervenciones. El Global Water Partnership (2012) define lineamientos claros para aplicar esta estrategia, logrando reducir en un 30 % los conflictos institucionales mediante la alineación de acciones bajo un marco hidrológico común.

Mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos hidrológicos aplicados a toda la cuenca, es posible identificar zonas críticas de escorrentía y diseñar corredores verdes que actúan simultáneamente como canales naturales y espacios públicos. La GWP (2012) documenta que aplicar este enfoque puede reducir hasta un 15 % los costos de infraestructura gris.

Además, planificar por cuenca fortalece la gobernanza local al involucrar a comunidades, autoridades y sectores productivos a través de comités de cuenca. Según el IPCC (2014), este modelo participativo permite ajustes continuos a las medidas adoptadas en respuesta a cambios climáticos y demográficos.

3.4.2 Conexión entre aguas lluvias, aguas residuales y escorrentía

Integrar las redes de aguas pluviales y residuales en sistemas duales equipados con válvulas de alivio permite derivar el exceso de lluvia hacia infraestructuras verdes, como tanques

de tormenta o humedales artificiales, antes de que el flujo alcance las plantas de tratamiento. De acuerdo con la U.S. EPA (2018), este tipo de solución puede disminuir las descargas combinadas entre un 40 % y un 50 % durante eventos de lluvia intensa.

Antes de la derivación final, parte del caudal puede pasar por dispositivos de bioretención o jardines de lluvia, donde los sustratos filtrantes y las plantas eliminan nutrientes y sedimentos. Según el IPCC (2014), este proceso natural puede reducir las concentraciones de nutrientes en el agua entre un 60 % y un 80 %, mejorando su calidad antes de su llegada al sistema de alcantarillado.

Además, los sistemas duales permiten reutilizar el agua tratada en actividades como el riego de áreas verdes o la recarga de acuíferos. Según UN Water (2016), cerrar el ciclo hídrico dentro de la misma cuenca puede ahorrar hasta un 20 % del consumo de agua potable, fortaleciendo la resiliencia ante sequías y variabilidad climática.

En redes separadas y combinadas, los tanques de tormenta y las cámaras de detención o retención funcionan como amortiguadores, ya que almacenan agua cuando llueve con una intensidad fuerte y la liberan cuando hay capacidad, lo que reduce descargas y mejora la operación, si bien consideramos que debe haber un plan de mantenimiento y operación coordinado.

3.4.3 Sistemas combinados vs. Separados

Los sistemas separados gestionan por separado las aguas pluviales y las aguas negras, lo que simplifica su operación en condiciones normales, pero limita la capacidad de respuesta en

lluvias extremas. En contraste, los sistemas combinados transportan ambos tipos de agua por una misma red, que, sin válvulas de alivio ni sistemas de retención, puede colapsar ante lluvias fuertes. La EPA (2015) sugiere emplear modelos híbridos que puedan funcionar en modo separado la mayor parte del tiempo, y activarse en modo combinado cuando se superan ciertos umbrales de caudal.

Este enfoque híbrido permite operar como sistema separado en condiciones habituales, y, ante eventos intensos, activar válvulas que canalizan el flujo mixto hacia tanques de tormenta o humedales. La Agencia Europea de Medio Ambiente (2015) afirma que esta estrategia puede reducir en un 25 % los costos de mantenimiento y optimizar el manejo de eventos extremos al aprovechar al máximo la capacidad instalada.

Incluir infraestructuras de apoyo como tanques de tormenta, cámaras de detención y bioswales garantiza la continuidad del servicio y reduce los vertidos no tratados en momentos críticos. El Global Water Partnership (2012) destaca que la combinación de estas soluciones con sistemas híbridos puede disminuir en un 50 % los vertidos sin tratamiento, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Figura 23

Estrategias de gestión integrada del recurso hídrico

Nota. Elaboración propia.

3.5 Estrategias innovadoras con tecnología inteligente

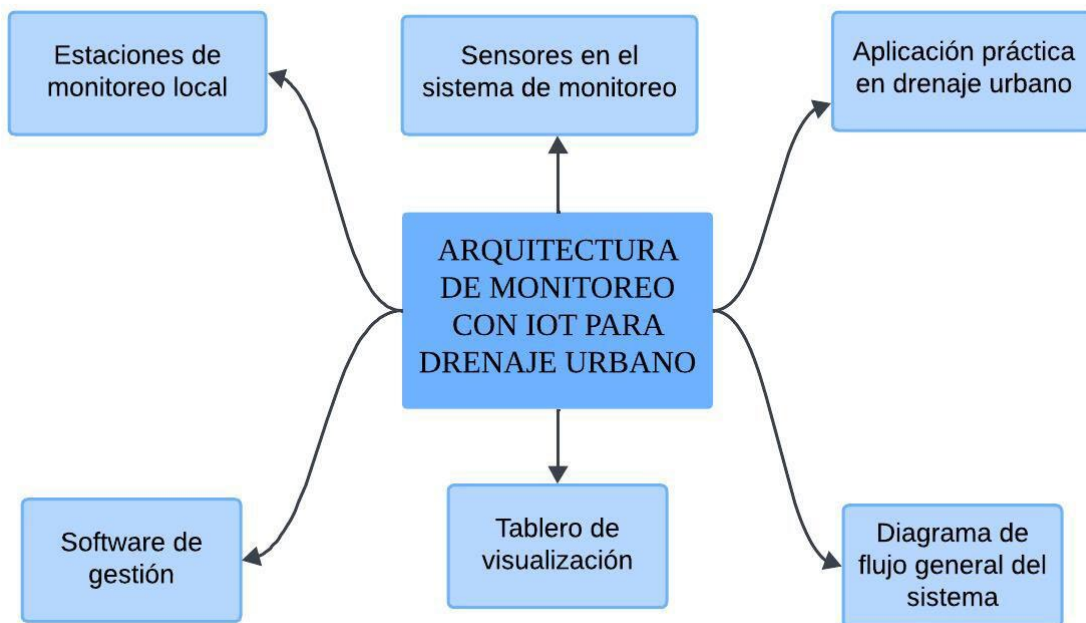
Esta frecuencia permite identificar aumentos súbitos en los niveles de canales y tuberías, ajustar los modelos hidrológicos sobre la marcha y anticipar inundaciones antes de que se conviertan en desbordes peligrosos.

Estos sensores recopilan la información enfocada en plataformas en la nube, las cuales se integran con sistemas de información geográfica (GIS), donde se incorporan pronósticos meteorológicos, mapas de riesgo y cartografía urbana. La guía para usuarios del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus especifica cómo estos flujos de datos se visualizan en tableros interactivos que se actualizan a cada minuto. Gracias a esta representación visual, las autoridades pueden identificar de manera rápida las zonas críticas, coordinar con precisión los recursos de emergencia y planificar rutas de evacuación de forma más eficiente. (Copernicus Emergency Management, 2015).

Los escenarios potenciales de inundación son simulados mediante motores de modelación hidrológica en tiempo real, los cuales son capaces de procesar al instante los datos de los sensores y los pronósticos de lluvia (nowcasting). Este enfoque es utilizado por el EFAS (Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones) para generar alertas con una anticipación de hasta seis horas, logrando una mejora del 20 % en la precisión con respecto a los métodos tradicionales y estáticos. Gracias al uso de algoritmos de aprendizaje automático, el Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (EFAS) actualiza constantemente sus umbrales de riesgo, lo cual permite emitir alertas con mayor anticipación y así brindar a la población un mayor intervalo de tiempo de respuesta ante posibles emergencias. (Pappenberger et al., 2012)

Todo lo anterior es efectivo, pero si dicha alerta se transmite correctamente y la población sabe cómo interpretarla. El Marco de Sendai resalta que la difusión debe estar acompañada por campañas de sensibilización, simulacros periódicos y una clara delimitación para los puntos de encuentro. Este marco también recomienda combinar tecnologías como SMS, aplicaciones móviles y sirenas con reuniones presenciales y material educativo. La confianza en el sistema aumenta cuando la comunidad practica las rutas de evacuación y comprende claramente el significado de cada señal. (UNISDR, 2015)

Por último, el sistema de monitoreo debe estar enlazado con protocolos de gestión del riesgo que integren sensores, simulaciones y difusión de alertas con las acciones de emergencia municipales. El Global Water Partnership (2012) destaca la necesidad de mantener un ciclo continuo de mejora que incluya: la detección, modelación, comunicación y respuesta, evaluado mediante indicadores como el tiempo de reacción y el cumplimiento de alertas. Un protocolo adaptable, que se actualice tras cada evento e incorpore las nuevas tecnologías, esto lo convierte en un pilar fundamental para fortalecer la resiliencia urbana.

Figura 24*Estrategias innovadoras con tecnología inteligente**Nota.* Elaboración propia.

3.6 Estrategias de participación ciudadana y gobernanza adaptativa

La base para lograr una ciudadanía consciente y comprometida con la gestión del agua en entornos urbanos es la educación ambiental. La UNESCO (2017) en su informe sobre Educación para los Objetivos de Desarrollo Sostenible recalca la necesidad de incluir en la educación formal y comunitaria temas clave como la gestión del ciclo urbano del agua, la prevención de inundación y enfoques participativos que fortalezcan la resiliencia social. Incluir actividades prácticas como recorridos por infraestructuras verdes o talleres de mantenimiento de bioswales, refuerzan el conocimiento técnico de las comunidades y fomenta un sentido de responsabilidad compartida en la gestión del entorno urbano.

Al involucrar a la ciudadana en la gestión del drenaje urbano, significa que deben reconocer su papel como agente corresponsable, esto conlleva a tener una participación directa en todas las etapas de este proceso: desde la planificación hasta la ejecución y el continuo cuidado de las soluciones realizadas. En el informe del Banco Mundial (2017), presentan casos sobre involucramiento ciudadano en servicios públicos, como asambleas barriales y presupuestos participativos, en donde las comunidades tienen un rol activo al definir y priorizar los proyectos de drenaje sostenible según las necesidades locales. Este tipo de estrategias fortalecen la transparencia y respaldo social, además de disminuir el vandalismo y de promover la creación de redes comunitarias dedicadas a la vigilancia y el cuidado de los espacios intervenidos.

El éxito de estas iniciativas depende en gran parte de que los gobiernos locales cuenten con marcos normativos que habiliten y respalden la cogestión del recurso hídrico junto con la comunidad. Según World Cities Report de UN-Habitat (2016) es esencial conformar espacios de gobernanza que integren autoridades municipales, ONGs, el sector académico y representantes vecinales. Estas demandas permiten alinear la planificación a nivel de cuenca con las regulaciones locales y así establecer lineamientos claros que garantice la participación comunitaria de forma efectiva y sostenible.

Para garantizar la continuidad de estas estrategias a largo plazo, es clave implementar campañas de comunicación efectivas que mantengan informada y motivada a la comunidad, al igual que destacar y celebrar públicamente los logros alcanzados de manera colectiva. En programas sobre gobiernos locales sostenibles, ICLEI (2018) recomienda el uso de indicadores

que sean comprensibles fácilmente, como paneles informativos que reflejen la disminución de escorrentía o el volumen de agua reutilizada, con el fin de mantener el apoyo ciudadano. El hecho de reconocer públicamente el papel de las comunidades en la implementación de SBN o en el monitoreo de sensores refuerza el sentido de pertenencia y motiva la participación continua.

Garantizar la continuidad institucional de estas prácticas requiere la implementación de incentivos adecuados y la creación de mecanismos de rendición de cuentas. En su informe sobre gobierno abierto la OCDE (2015), propone herramientas como lo son los informes semestrales de progreso, auditorías ciudadanas y espacios de evaluación pública. Esta transparencia constante genera confianza entre los actores y asegura que la gobernanza del drenaje urbano se adapte de manera dinámica a los cambios sociales y climáticas.

3.7 Síntesis de estrategias integradas hacia sistemas de drenaje resilientes y sostenibles

Como cierre de este capítulo, se presenta la Tabla 5 que resume de forma clara y concisa las principales estrategias abordadas, destacando sus beneficios desde tres dimensiones clave: ambiental, social y económica. Además, se incluyen casos concretos de ciudades que han implementado cada enfoque con éxito, lo que permite visualizar su aplicabilidad en contextos reales y extraer aprendizajes valiosos para otras comunidades urbanas interesadas en aplicar estas soluciones.

Tabla 5*Estrategias regionales ante el cambio climático*

Estrategia	Ambiental	Social	Económico	Ejemplo destacado
Técnicas o de infraestructura gris	Caudales controlados	Menos puntos críticos	Menos fallos y reparaciones	Bucarest (Radu et al., 2025)
Sostenibles basadas en la naturaleza (SBN)	Escorrentía ↓	Nuevos hábitats verdes	Ciclo de vida eficiente	Rotterdam (techos verdes extensivos)
Enfoques integrados	Coordinación de recursos	Comités de cuenca	Optimización presupuestal	Singapur (tanques subterráneos y reuse)
Innovadoras con tecnología inteligente	Menos descargas combinadas	Confianza y simulacros	Menores daños y reparaciones	Chicago (red de sensores IoT)
Participación ciudadana y gobernanza adaptativa	Sensibilización ambiental	Co-gestión comunitaria	Mantenimiento preventivo	Curitiba (“Programa Río Vivo” de humedales)

Nota. Elaboración propia.

La combinación de estrategias como el rediseño técnico, la implementación de soluciones basadas en la naturaleza, la gestión integrada por cuenca, el monitoreo activo y la participación ciudadana permiten construir un sistema de drenaje urbano más eficiente, adaptable y resiliente frente a los retos del cambio climático y el crecimiento urbano.

En Bucarest, Radu et al. (2025) integraron tuberías sobredimensionadas, bioswales y sistemas de alerta con tecnología IoT, permitiendo aumentar en un 30 % la capacidad de evacuación de aguas en eventos de lluvia extrema y evidenciando el valor de los sistemas híbridos.

Desde el punto de vista ambiental, ciudades como Róterdam han apostado por techos verdes extensivos y la vegetación en áreas como estacionamientos. Estas intervenciones han permitido retener hasta un 80 % de la precipitación anual, generando hábitats para la biodiversidad urbana. Berndtsson (2010) destaca cómo estas soluciones también ayudan a reducir el efecto de isla de calor y a mejorar la calidad del aire.

En la dimensión social, Filadelfia lidera programas comunitarios de SUDS, donde los habitantes participan en el diseño y cuidado de jardines de lluvia, y promueven actividades como los “Días de Limpieza de Cuenca”. El Marco de Sendai (UNDRR, 2015) señala que este tipo de prácticas, combinadas con simulacros y difusión educativa, puede disminuir hasta en un 40 % la vulnerabilidad en barrios propensos a inundaciones.

Desde el enfoque económico, Singapur ha implementado soluciones modulares prefabricadas y tanques de tormenta subterráneos, logrando reducir en un 20 % los costos de ciclo de vida respecto a infraestructuras convencionales. Según el Global Water Partnership (2012), estas soluciones permiten escalar proyectos incluso en ciudades con limitaciones de espacio.

Finalmente, el componente educativo y de gobernanza encuentra un ejemplo destacado en Curitiba, Brasil, donde escuelas y organizaciones comunitarias forman parte activa del “Programa Río Vivo”. Allí cuidan humedales urbanos, participan en monitoreo ambiental y promueven la apropiación de espacios públicos resilientes. ICLEI (2018) enfatiza que cuando la

comunidad percibe beneficios reales, como áreas verdes recuperadas y menor frecuencia de inundaciones, la sostenibilidad se convierte en un objetivo común y duradero.

Figura 25

Estrategias para la gestión sostenible



Nota. Elaboración propia.

Capítulo 4. Normativa y políticas de adaptación urbana al cambio climático

El capítulo 4 presenta el marco que se necesita abordar para tomar decisiones de diseño y gestión del drenaje urbano frente a lluvias cada vez más intensas que ya están desbordando redes y obras concebidas con curvas IDF históricas; por eso se parte de la evidencia científica reciente (IPCC AR6) y se traduce en criterios prácticos para planear, diseñar, operar y mantener sistemas más resilientes. El Acuerdo de París (art. 7) y el Marco de Sendai piden incorporar la adaptación y la gestión del riesgo en la planificación urbana; metodológicamente, se fundamenta con la ISO 14090 (principios y requisitos de adaptación) y ISO 14091 (evaluación de vulnerabilidad y riesgo) para estructurar el paso a paso.

4.1 Marco normativo internacional

En este trabajo se toma como punto de partida los compromisos y estándares internacionales que convierten la adaptación al clima en un requisito operativo para el drenaje urbano. El Acuerdo de París fija un objetivo global de adaptación, aumentar la capacidad adaptativa, fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad que los países deben integrar en su planificación y comunicar periódicamente; esto obliga, a escala de proyecto, a justificar por qué se adoptan ciertos criterios de diseño y de gestión frente a lluvias más intensas (Delbeke, et.al, 2019).

En la misma lógica, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015–2030) ordena actuar en cuatro prioridades: comprender el riesgo, fortalecer la gobernanza,

invertir en reducción del riesgo y reconstruir mejor tras los eventos. Para el drenaje urbano, esto equivale a pasar de obras aisladas a sistemas gestionados por cuenca, con mantenimiento e indicadores que midan desempeño a lo largo del ciclo de vida (Pearson & Pelling, 2015).

Para operar estas obligaciones, se usan las normas ISO como metodología base. ISO 14090:2019 establece los principios y requisitos para integrar la adaptación en organizaciones y proyectos (preplanificación, implementación, seguimiento y mejora); ISO 14091:2021 detalla cómo evaluar riesgos y vulnerabilidades presentes y futuros; y ISO 37123:2019 ofrece indicadores de resiliencia urbana que sirven como tablero de control para obras y para la ciudad. Con estas tres piezas se puede documentar el paso a paso: diagnóstico, selección de medidas (gris-verde), metas de desempeño y monitoreo.

Como referencia regulatoria y programática, se adopta la Estrategia de Adaptación de la Unión Europea (2021), que impulsa una adaptación más inteligente (datos y riesgo), más sistémica (todos los sectores) y más rápida (acelerar implementación), y se vincula con dos directivas estructurales: la Directiva de Inundaciones 2007/60/CE, que exige evaluación preliminar del riesgo, mapas de peligrosidad y planes de gestión del riesgo de inundación; y la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE, que obliga a gestionar por distrito hidrográfico la calidad y cantidad del agua. Estas piezas son útiles como marco de buenas prácticas para municipios que están actualizando criterios de drenaje, incluso fuera de la UE (Aguiar, et.al, 2018).

Para el diseño detallado de soluciones basadas en la naturaleza (SuDS/SUDS), se usa el SuDS Manual C753 (CIRIA, 2015) como guía técnica de referencia, catálogo de tipologías

(bioretención, pavimentos permeables, humedales construidos, techos verdes), criterios hidráulicos y de calidad, construcción y operación/mantenimiento, lo cual permite estandarizar criterios en memorias y especificaciones (Huynh, et.al, 2025).

Finalmente, se observa la tendencia regulatoria del Reino Unido a volver obligatorios los SuDS en desarrollos nuevos mediante el Schedule 3 de la Flood and Water Management Act 2010. Gales lo implementó desde enero de 2019 creando las SuDS Approving Bodies (SAB) y estándares nacionales; Inglaterra anunció en 2023 su intención de implementarlo y, aunque ha habido consultas y preparación durante 2024, diversas evaluaciones señalan que la entrada en vigor nacional aún está pendiente (2024–2025). Este caso aporta una ruta concreta de gobernanza (aprobación previa, adopción y O&M obligatorios) que puede inspirar reformas locales en nuestra región (Ellis & Lundy, 2016).

4.2 Contexto estadounidense

Pasando a un contexto de Estados Unidos, la gestión de aguas lluvias urbanas está regida por la Clean Water Act a través del programa NPDES; para las zonas con redes pluviales MS4, el permiso exige un Stormwater Management Program (SWMP) con términos claros, específicos y medibles que reduzcan descargas al máximo técnicamente practicable (MEP) y protejan la calidad del agua. En la práctica, esto se opera mediante las seis medidas mínimas (educación, participación, detección de descargas ilícitas, control en obra, control posconstrucción y operación municipal)

Para el control posconstrucción, que es donde se decide el desempeño hidráulico y de calidad del agua a largo plazo, la EPA ha compilado cómo los permisos MS4 están incluyendo estándares de desempeño (retención in situ, tasas de descarga) y la infraestructura verde como criterio de aprobación, junto con la obligación de operación y mantenimiento de las prácticas instaladas (LaRoss, 2015).

En áreas inundables, el referente técnico para edificaciones y obras asociadas es ASCE/SEI 24, cuya edición 24-24 (2024) introduce cambios relevantes y se alinea con ASCE 7-22 para cargas por inundación. ASCE 24 está diseñado para cumplir o exceder los requisitos del NFIP y suele ser incorporado por los International Codes y por ordenanzas locales (Coulbourne, et.al, 2025).

Respecto a precipitaciones de diseño, el conjunto NOAA Atlas 14 sigue siendo el dato oficial vigente a escala nacional, accesible vía el PFDS. NOAA está desarrollando Atlas 15 con financiamiento federal reciente; los materiales oficiales señalan que Atlas 14 continúa como autoridad mientras Atlas 15 avanza. Distintos reportes recientes indican, sin embargo, ajustes en el alcance: se prevé que Volumen 1 reemplace gradualmente a Atlas 14, mientras que los componentes prospectivos han tenido cambios de cronograma y foco (Kim, et.al, (2022).

4.3 Contexto América Latina

En Colombia, la parte jurídica empieza de la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC, 2017) y se vuelve exigible con la Ley 1931 de 2018, que ordena incorporar la gestión

del cambio climático en decisiones públicas y privadas; se articula con la Ley 1523 de 2012 (gestión del riesgo) y con el Decreto 1077 de 2015 (ordenamiento urbano y licenciamiento). Para el sector agua y drenaje, el RAS 2017 (Res. 0330 de 2017) y sus modificaciones (Res. 0799 de 2021) son el piso técnico: allí se consolida el control en la fuente y se abre la puerta a SUDS en nuevos desarrollos. Este proyecto adopta además la Guía metodológica de SUDS (MinVivienda, 2022), que define tipologías y, sobre todo, exige pensar desde el diseño el plan de operación y mantenimiento para que las obras funcionen en el tiempo. Con este marco, las memorias de cálculo y los planos de detalle de SUDS se convierten en evidencia de cumplimiento y no solo en buenas prácticas.

La evidencia local respalda esta ruta: trabajos con enfoque aplicado y tesis recientes muestran la viabilidad técnica de SUDS y la importancia del mantenimiento en desempeño real. Estos insumos son útiles para justificar elecciones de tipologías (bioretención, pavimentos permeables y techos verdes) y para dimensionar la carga de O&M en el presupuesto municipal.

En México, la Ley General de Cambio Climático (LGCC), con texto actualizado a 2024, establece la arquitectura de gobernanza y la obligación de planes y programas de adaptación con concurrencia de órdenes de gobierno. Para el balance hídrico y la gestión por cuenca, la NOM-011-CONAGUA-2015 fija el método para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales; aunque no es una norma de drenaje urbano, sí condiciona las decisiones de captación, recarga e infiltración asociadas a SUDS. En términos de inversión pública, el PROAGUA (Manual de Operación y Procedimientos Urbano, 2019) estandariza requisitos técnico-

administrativos para proyectos urbanos de agua y saneamiento, útil como lista de chequeo de madurez de proyectos (costos, responsables, metas).

El respaldo empírico reciente en México muestra beneficios sociales y operativos de soluciones descentralizadas: por ejemplo, evaluaciones de sistemas de captación de lluvia en Ciudad de México resaltan beneficios y condiciones de implementación, mientras estudios sobre infraestructura verde en la capital exploran su efecto en reducción de encharcamientos y aportan criterios de priorización territorial. Estos hallazgos se incorporan aquí para seleccionar tipologías y para definir indicadores de desempeño (laminación de picos, volúmenes retenidos, calidad del agua) medibles a escala de proyecto.

Argentina cuenta con la Ley 27.520 (2019) de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación, que creó el Gabinete Nacional de Cambio Climático y ordenó planes de adaptación sectoriales y territoriales. Ese mandato se concretó en el Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al 2030 (PNAYM 2022–2030), formalizado por el Ministerio de Ambiente en 2023, que sistematiza medidas e instrumentos hasta 2030 e incorpora líneas para inundaciones urbanas. Para este trabajo, ese plan es referencia de política pública y criterio de coherencia para proyectos locales que adopten SUDS y gestión por cuenca.

A escala local, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires ya publica lineamientos y manuales para SUDS en espacio público (aplicables en bulevares, aceras, plazas y parques), lo que ofrece detalles de diseño y operación transferibles a otros municipios. Además, trabajos académicos y de grado recientes exploran la adaptación de SUDS a barrios del Conurbano Bonaerense,

reforzando que el éxito depende de integrar criterios hidráulicos con capacidad de mantenimiento municipal. Estas referencias informan la selección de tipologías y la definición del plan de O&M que acompaña a la memoria de diseño en este documento.

4.4 Evidencia académica

La literatura reciente converge en un mensaje claro: el drenaje convencional, por sí solo, ya no alcanza bajo climas más extremos; la respuesta efectiva combina redes grises con soluciones basadas en la naturaleza (SUDS/NbS), incorpora datos de lluvia no estacionarios y pone el mantenimiento en el centro de la gestión. Revisiones comparativas de casos en múltiples ciudades muestran que las estrategias híbridas (bioretención, pavimentos permeables, techos verdes y humedales construidos) reducen picos y volúmenes y aportan beneficios urbanos, siempre que se integren desde la planificación por cuenca y con requisitos claros de operación y monitoreo (Kourtis & Tsihrintzis, 2021).

En paralelo, los estudios climáticos y de hidrología urbana confirman tendencias crecientes en la magnitud y frecuencia de lluvias intensas y sus impactos en escorrentía y calidad de agua, lo que obliga a revisar criterios de diseño. La actualización de curvas IDF bajo no-estacionariedad dejó de ser una recomendación académica para convertirse en buena práctica: las revisiones de 2023 sintetizan métodos para incorporar cambio climático a IDF, evaluar sensibilidad y comunicar la incertidumbre, de modo que los proyectos adopten márgenes prudentes y escenarios al dimensionar (Wang, et.al, 2024).

Sobre desempeño técnico, las síntesis y meta-análisis publicados entre 2021 y 2025 reportan retenciones significativas de escorrentía y disminución de cargas contaminantes en tipologías SUDS. Por ejemplo, una síntesis global sobre techos verdes documenta altas tasas de retención anual y efectos consistentes en la laminación de picos, mientras que revisiones recientes de infraestructura verde comparan cinco tipologías y confirman su aporte a la reducción de volúmenes y a la mejora de calidad, con variabilidad explicada por clima, sustrato, mantenimiento y escala de implementación. Estas conclusiones avalan que las normas locales pidan estándares de desempeño posconstrucción (Zheng, et.al, 2021).

La operación y mantenimiento es el factor decisivo para que los SUDS funcionen en el tiempo. Una revisión de 2024 identifica cinco barreras recurrentes: contexto local (suelos, clima, usos), arreglos institucionales difusos, financiamiento insuficiente, capacidades técnicas desiguales y debilidades en monitoreo; la salida política pasa por clarificar responsabilidades y normalizar inspecciones con indicadores simples (Knapik, et.al, 2025).

Finalmente, en ciudades costeras la literatura es enfática: el riesgo es compuesto (lluvia, marea, oleaje, ascenso del nivel del mar), y la adaptación exige medidas integradas (barreras naturales, almacenamiento, bombeo y control en la fuente) y gobernanza interinstitucional. Las revisiones de 2024 en *Journal of Hydrology* muestran que las soluciones solo grises, quedan cortas si no se coordinan con infraestructura verde y con la gestión de niveles freáticos. Por ello, cuando el sitio de intervención esté en planicie costera, se asumen criterios más conservadores en lámina libre, retroflujo y capacidad de bombeo (Aziz, et.al, 2024).

Capítulo 5. Estudios de caso

En este capítulo se presentan cinco experiencias internacionales, con datos y resultados medibles, que muestran cómo distintas ciudades han adaptado su drenaje urbano con soluciones ecológicas (SUDS/infraestructura verde-azul), qué desafíos encontraron y cómo los fueron resolviendo. El enfoque es práctico: contexto, intervención, evidencias y lecciones transferibles.

5.1. Filadelfia (EE. UU.), Green City, Clean Waters

Filadelfia optó por un plan a 25 años que prioriza infraestructura verde para controlar desbordes del alcantarillado combinado (CSO), con la meta de acres enverdecidos como indicador de cumplimiento. A mitad del plan, la ciudad reporta más de 2.800 green tools instaladas en casi 800 sitios, manteniendo cerca de 3.000 millones de galones de escorrentía y CSO fuera de los ríos cada año, y avanzando hacia 9.564 acres enverdecidos a 2036 (Heffernan, et.al, 2016).

En la figura 26 se puede apreciar la ejecución de este proyecto, que ha sido de gran beneficio para las comunidades y ha tomado gran interés en las Universidades, tanto así que ya se han ejecutado en varios campus, como en diferentes ciudades de Estados Unidos.

Figura 26

Green City, Clean Waters.



Nota. Ilustración tomada de ASLA 2014 Professional Honor Award in General Design, Shoemaker Green, University of Pennsylvania, Andropogon/Barrett Doherty.

Se hizo un portafolio híbrido de jardines de lluvia, pavimentos permeables, techos verdes y humedales urbanos, con criterios posconstrucción exigibles desde permisos (NPDES) y lineamientos de desempeño. (Heffernan, et.al, 2016).

Como resultado, los estudios muestran efectos hidrológicos en corrientes urbanas con GSI, y evaluaciones de triple cuenta (ambiental-social-económica) documentan beneficios (isla de calor, seguridad, espacios públicos) (Heffernan, et.al, 2016).

5.2. Copenhagen (Dinamarca), Plan de Nubes Torrenciales (Cloudburst)

El evento extremo de 2011 (150 mm en 2 h y US\$ 1.000 M en daños) impulsó un plan integral que combina soluciones verde-azul en superficie con túneles donde es necesario. Se hizo una conversión de barrios y parques en esponjas urbanas. Caso icónico fue el de Enghaveparken, parque histórico reconfigurado con una capacidad de 22.600 m³ para tormentas, barreras auto-accionadas y usos recreativos en tiempo seco; en calles, sectores como Sankt Kjelds reemplazaron asfalto por urnas verdes y 586 nuevos árboles para retener/laminar agua localmente (Braae & Riesto, 2017).

En la siguiente ilustración se aprecia la combinación de pavimentos permeables y jardines que ayudan a mantener las vías de Copenhagen libres de escorrentía y poder tener los peatones una buena circulación por cada una de estas ciudades.

Figura 27

Copenhagen - Plan de nubes..



Nota. Ilustración tomada de Trenjenatur.

La estrategia ciudad-escala prioriza cuencas de nubes torrenciales (300 proyectos a 20 años) y ha demostrado que los parques-esponja y calles verdes evitan sobrecargar el alcantarillado y reducen daños en eventos intensos.

5.3. Singapur, ABC Waters y el parque Bishan Ang Mo Kio

La ciudad-estado modernizó su red pluvial promoviendo diseño ABC Waters y límites al coeficiente de escorrentía en nuevos desarrollos; su proyecto faro es la renaturalización del río Kallang dentro del parque Bishan–Ang Mo Kio (An, et.al, 2020).

En la figura 28 se aprecia uno de los proyectos de mayor envergadura, que busca combatir la contaminación y ayudar al medio ambiente, buscando también el beneficio de la

población que vive en las ciudades, respirando aire más puro y saludable, teniendo así una ciudad más resiliente y sostenible.

Figura 28

Bishan- Ang Mo Kio Park.



Nota. Ilustración tomada de Ramoll Studio Dreiseitl.

Lo que se hizo fue que se substituyó un canal recto de 2,7 km por un cauce sinuoso integrado al parque (62 ha), que puede expandirse hasta 100 m de ancho en crecidas; la capacidad de conducción aumentó en torno al 40 %. Esto, además del control de crecidas, el

corredor verde-azul elevó el uso recreativo y biodiversidad, como documentan revisiones y fichas oficiales del programa ABC Waters.

5.4. Wuhan (China), Ciudad Esponja

Como ciudad piloto del programa Sponge City, Wuhan invirtió del orden de CNY 10,2 mil millones para reducir encharcamientos, mejorar calidad de agua y captar lluvia; la estrategia combinó SUDS a escala de barrio con corredores hídricos. Esto se hizo con estrategias como techos y plazas permeables, jardines de lluvia, humedales, tanques y control de descargas, articulados con redes y lagunas existentes. Evaluaciones recientes muestran reducción de escorrentía anual y mitigación de desbordes para eventos frecuentes (1–5 años de retorno) (Oates, et.al, 2020).

En la figura 29 se aprecia la estrategia que están implementando en China, favoreciendo al medio ambiente y a tener ciudades más sostenibles y resilientes. Además, favorecen la calidad de vida de las personas, dado que ayudan a tener un aire más limpio y menos contaminado.

Figura 29

Ecoparque de los Manglares de Sanya (China).



Nota. Ilustración tomada de Kongjian Yu / Turenscape.

Las revisiones 2015–2024 destacan avances, pero también límites ante tormentas cortas de muy alta intensidad y retos de materiales, estandarización y adaptación a condiciones locales. Lección: escalar SUDS debe ir acompañado de planificación por cuenca y criterios de diseño ajustados al clima local.

5.5. Ciudad de México, Cosecha de Lluvia

Programa social de captación de lluvia domiciliar para aliviar escasez y, a la vez, descargar el drenaje durante temporada húmeda, activo desde 2019 en 11 alcaldías, instaló anualmente de 10–21 mil sistemas (según año), con capacitación y muestreo de calidad. Entre

2019 y 2024 se reportan 72.887 sistemas instalados (10.003 en 2019; 10.007 en 2020; 11.094 en 2021; 21.455 en 2022; 10.063 en 2023; 10.265 en 2024, todos con subsidio total en 2024).

En la ilustración 30 se puede apreciar el tanque de almacenamiento que se está utilizando en este programa de aprovechamiento de aguas lluvias en los hogares de ciudad de México, favoreciendo con incentivos a la población para que utilicen estos programas y tengan mayores beneficios en ahorro de agua y pago de acueducto.

Figura 30

Cosecha de lluvia – Ciudad de México (México).



Nota. Ilustración tomada de USE Metropolis.

Como resultado, informes públicos estiman más de 70.000 sistemas y más de 230.000 personas beneficiadas 2019–2024; evaluaciones internas muestran alta satisfacción y uso predominante por mujeres, con percepción de mejora en acceso al agua.

Conclusiones

1. La información obtenida sobre adaptación del drenaje urbano, indica cómo crece de forma sostenida y reciente, con fuerte participación de EE. UU., Reino Unido y China. En cambio, en América Latina el interés aumenta a partir de eventos de inundación y vulnerabilidad urbana.
2. El análisis bibliométrico también presenta una mayor frecuencia sobre riesgos por lluvias intensas, soluciones híbridas (gris-verde) y uso de modelos. Se evidencian los vacíos en estudios comparativos y de seguimiento a largo plazo del desempeño real.
3. La evidencia climática muestra un aumento tanto en la intensidad como en la frecuencia de lluvias extremas, lo que vuelve insuficientes muchos criterios de diseño basados en series históricas.
4. Las inundaciones se consolidan como el peligro más frecuente y costoso de la región, con afectaciones desproporcionadas en áreas densamente urbanizadas y con menor capacidad adaptativa.
5. Los portafolios híbridos (red convencional + soluciones basadas en la naturaleza) demuestran mayor eficacia para reducir picos y volúmenes de escorrentía, además de mejorar la calidad del agua y aportar co-beneficios urbanos.

6. La experiencia comparada confirma que el éxito de estas estrategias depende menos del tipo de obra y más de la gobernanza y del mantenimiento: sin roles claros, presupuesto y rutinas de O&M, el desempeño cae rápidamente.
7. Los marcos internacionales (París, Sendai) y las normas técnicas (ISO 14090/14091, guías sectoriales) ya colocan la adaptación como un requisito operativo, no solo como una recomendación.
8. Aunque en la región existen avances normativos y guías específicas (por ejemplo, para SUDS), aún se requiere mayor armonización entre niveles de gobierno y mecanismos efectivos de seguimiento y fiscalización.
9. De la revisión de Filadelfia, Copenhague, Singapur, Wuhan y Ciudad de México se desprende que las soluciones ecológicas, cuando se diseñan con metas claras y se sostienen en el tiempo, sí reducen desbordes, mejoran la calidad del agua y generan beneficios sociales y ambientales.
10. Los factores habilitadores se repiten: financiamiento estable, mantenimiento programado, participación comunitaria y una institucionalidad que aprueba, adopta y monitorea.

Recomendaciones

1. Se recomienda para una consolidación de redes de datos y comparativos regionales, la priorización de métricas comunes (picos, volúmenes, costos y co-beneficios).
2. Se recomienda impulsar investigaciones longitudinales que evalúen Operación y Mantenimiento (O&M) y desempeño de SUDS en distintos climas urbanos.
3. Es indispensable actualizar las curvas IDF y los periodos de retorno incorporando análisis de sensibilidad (escenarios de incremento de intensidades) y mapas de riesgo por cuenca.
4. Se sugiere establecer protocolos operativos para años dominados por ENSO: limpieza preventiva, control de puntos críticos, bombeo contingente y almacenamiento temporal.
5. Cada proyecto debe fijar estándares pos-construcción verificables (retención/descarga, tiempos de vaciado, metas de calidad) y adjuntar fichas de O&M por tipología.

6. Resulta conveniente avanzar mediante pilotos de rápida ejecución con evaluación de costo-efectividad y una hoja de ruta de escalamiento por cuencas, priorizando los sitios de mayor riesgo.
7. Se propone institucionalizar en los expedientes la matriz de cumplimiento (norma, requisito, ¿cómo se cumple? y evidencia en planos, memorias y plan de O&M).
8. Es pertinente definir indicadores de seguimiento alineados con las exigencias locales, desempeño hidráulico, calidad del agua y operación, y reportarlos con periodicidad definida.
9. Conviene adaptar los criterios a la realidad local mediante portafolios por cuenca con metas verificables (p. ej., porcentaje de reducción del pico o del volumen vertido) y cronogramas de implementación por fases.
10. Se recomienda blindar la continuidad institucional: presupuestos de O&M asegurados, responsables identificados, auditorías anuales y mecanismos de participación que prioricen intervenciones en zonas de mayor vulnerabilidad

Referencias

- Acuña, C., Chile, A., & AFP. (1 de abril de 2025). *Radio Nacional Colombia*. Obtenido de Radio Nacional Colombia: <https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/informe-fenomenos-climaticos-america-latina>
- Aguiar, F. C., Bentz, J., Silva, J. M., Fonseca, A. L., Swart, R., Santos, F. D., & Penha-Lopes, G. (2018). Adaptation to climate change at local level in Europe: An overview. *Environmental Science & Policy*, 86, 38-63.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.04.010>
- An, Z., Chen, Q., & Li, J. (2020). Ecological strategies of urban ecological parks—A case of Bishan Ang Mo Kio Park and Kallang River in Singapore. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 194, p. 05060). EDP Sciences.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019405060>
- Anderson, J., Wallace, D., Simms, A., Rodriguez, A., Weight, R., & Taha, P. (8 de Marzo de 2016). *Recycling sediments between source and sink during a eustatic cycle: Systems of late Quaternary northwestern Gulf of Mexico Basin*. doi:10.1016/j.earscirev.2015.10.014
- Arroyo, L. (15 de junio de 2024). *El País*. Obtenido de El País: <https://elpais.com/america-futura/2024-06-16/las-guerras-del-agua-cinco-frentes-que-el-cambio-climatico-abre-en-america-latina.html>
- ASCE. (2018). *Infraestructura resiliente al clima: diseño adaptativo y gestión de riesgos*. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415191>

- Aziz, F., Wang, X., Mahmood, M. Q., Awais, M., & Trenouth, B. (2024). Coastal urban flood risk management: Challenges and opportunities– A systematic review. *Journal of Hydrology*, 645, 132271. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132271>
- Blakime, T.-H., Komi, K., Adjonou, K., Dogbeda, A., Senanou, K., Oyedele, P., . . . Kokou, K. (25 de Julio de 2024). *Derivation of a GIS-Based Flood Hazard Map in Peri-Urban Areas of Greater Lomé, Togo (West Africa)*. doi:10.3390/urbansci8030096
- Blázquez, J., & Solman, S. (Octubre de 2020). *Multiscale precipitation variability and extremes over South America: analysis of future changes from a set of CORDEX regional climate model simulations*. doi:10.1007/s00382-020-05370-8
- Braae, E., & Riesto, S. (2017). Designing Urban Natures: Ambiguities in urban space design on the threshold of climate disaster. *kritische berichte-Zeitschrift für Kunst-und Kulturwissenschaften*, 45(2), 92-101.
- Carson, L., Goodman, C., Duin, B., & Neumann, N. (7 de Agosto de 2024). *Aplicación de un conjunto de herramientas de seguimiento de fuentes microbianas y patógenas para identificar problemas de infraestructura en redes de drenaje de aguas pluviales: un estudio de caso*. Obtenido de <https://journals.asm.org/doi/10.1128/spectrum.00337-24>
- CEPAL. (2022). *Gestión del riesgo de desastres: Marco de acción integral para América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48251-gestion-riesgos-desastres-marco-accion-integral-america-latina-caribe>
- Chai, Y., Yue, Y., Zhang, L., Miao, C., Borthwick, A., Zhu, B., . . . Dolman, A. (20 de Marzo de 2020). *Homogenization and polarization of the seasonal water discharge of global rivers in response to climatic and anthropogenic effects*. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136062

- Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. (26 de mayo de 2021). *Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States*. doi:10.1002/joc.7225
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (Febrero de 2014). *Manual para la Evaluación de Desastres*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/df2fa48c-418c-4b2a-957c-0bdd97181d27/content>
- Comité de Adaptación al Cambio Climático. (3 de Octubre de 2018). *Infraestructura resiliente al clima: diseño adaptativo y gestión de riesgos (MOP 140)*. doi:10.1061/9780784415191
- CRED - USAID. (2023). *Hydrological Disasters in South America*. Obtenido de <https://files.emdat.be/2024/07/CredCrunch75.pdf>
- Coulbourne, W. L., Cox, D. T., Cerino, C., & Reeder, A. (2025). Critical Updates to ASCE Flood Design Standards. In *Structures Congress 2025* (pp. 291-298). <https://doi.org/10.1061/9780784486085.026>
- Delbeke, J., Runge-Metzger, A., Slingenberg, Y., & Werksman, J. (2019). The paris agreement. In *Towards a climate-neutral Europe* (pp. 24-45). Routledge. Tomado de: www.taylorfrancis.com
- Ecoflora. (2024). *Diseño, construcción y venta de sistemas de riego*. Obtenido de <https://www.ecoflora.com.co/disenio-construccion-y-venta-de-sistemas-de-riego-agroforestal/>
- EcoInventos Green Technology. (6 de Agosto de 2022). *Jóvenes diseñan «tejas vivas» capaces de purificar el aire que se adaptan a cualquier tejado*. Obtenido de EcoInventos: <https://ecoinventos.com/tejas-vivas/>

- Ellis, J. B., & Lundy, L. (2016). Implementing sustainable drainage systems for urban surface water management within the regulatory framework in England and Wales. *Journal of Environmental Management*, 183, 630-636.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.022>
- Figuerola-Avalos, S., Correa-Fuentes, D., López-de-la-Cruz, J., Gutiérrez-Valencia, J., & Barajas-Ávalos, I. (29 de Diciembre de 2024). *Evaluación de barriles de lluvia y techos verdes para mitigar inundaciones en clima cálido subhúmedo, Estado de Colima, México*. doi:10.22320/07190700.2024.14.02.07
- Fitobor, K., Ulanczyk, R., Kolecka, K., Ramm, K., Wlodarek, I., Zima, P., . . . Gajewka, M. (23 de Junio de 2022). *Extreme weather layer method for implementation of nature-based solutions for climate adaptation: Case study Shupsk*. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.156751
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Follet, C. (21 de Mayo de 2020). *Centros de Progreso, Parte 3: Mohenjo-Daro (saneamiento)*. Obtenido de HumanProgress.org
- Freimund, C., Garfin, G., Norman, L., Fisher, L., & Buizer, J. (9 de Febrero de 2022). *Flood resilience in paired US–Mexico border cities: a study of binational risk perceptions*. doi:10.1007/s11069-022-05225-x
- French, A., Mechler, R., Arestegui, M., & Macclune, K. (Febrero de 2020). *Root causes of recurrent catastrophe: The political ecology of El Niño-related disasters in Peru*. doi:10.1016/j.ijdr.2020.101539

- Garreaud, R. (2025). *Intensas lluvias precoces en el Altiplano*. Programa Hidroclimático Regional para los Andes (ANDEX). <https://www.andex-rhp.org/?p=4315>
- Giraldo, J. (2 de Febrero de 2023). *Analysis of ENSO-driven variability, and long-term changes, of Extreme Precipitation Indices in Colombia, using the Satellite Rainfall Estimates CHIRPS*. Obtenido de <https://perfilesycapacidades.javeriana.edu.co/es/projects/analysis-of-enso-driven-variability-and-long-term-changes-of-extr-3>
- Giraldo, J., Trujillo, D., & Báez, O. (28 de Mayo de 2022). *Analysis of ENSO-Driven Variability, and Long-Term Changes, of Extreme Precipitation Indices in Colombia, Using the Satellite Rainfall Estimates CHIRPS*. doi:10.3390/w14111733
- Goutam, K., Ashok, M., Yoshihabe, W., & Michael, M. (23 de Junio de 2020). *Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Grigg, N. (18 de Julio de 2024). *Gestión de aguas pluviales: un enfoque integrado para promover ciudades saludables, habitables y ecológicas*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2413-8851/8/3/89>
- Heffernan, T., White, S., Krechmer, T., Manna, N., Bergerson, C., Olsen, M., & Cruz, J. (2016). Green Stormwater Infrastructure Monitoring of Philadelphia's Green City, Clean Waters Program. In *World Environmental and Water Resources Congress 2016* (pp. 115-124) <https://doi.org/10.1061/9780784479889.013>
- Heinrichs, D., Müller, A., Welz, J., & Hansjürgens, B. (25 de Octubre de 2010). *Socio-Environmental Change and Flood Risks: The Case of Santiago de Chile*. doi:10.2307/25822104

Hoban, A. (2019). Water sensitive urban design approaches and their description. In *Approaches to water sensitive urban design* (pp. 25-47). Woodhead Publishing.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00002-2>

Humerez, J., & Zeballos, F. (2024). *Conflictos e imaginarios en dos deslizamientos de tierra en La Paz, Bolivia*. doi:10.35319/jcomsoc.2023181309

Huntington, T. (15 de Marzo de 2006). *Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis*. Obtenido de ScienceDirect:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169405003215>

Huynh, T. N., Nguyen, H. T., & Le, H. T. N. (2025). A Quantitative Approach to Selecting SUDS for Flood Resilience in Can Tho City, Mekong Delta. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 16(2), 164-

176. <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/22120>

IDEAM. (2025). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. Recuperado el 4 de Julio de 2025, de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos:

<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Iglesias-Rey, P., Martínez-Solano, F., Saldarriaga, J., & Navarro-Planas, V. (9 de Mayo de 2017). *Pseudo-genetic Model Optimization for Rehabilitation of Urban Storm-water Drainage Networks*. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.278

Insua, D., Ceppi, C., Meléndez, K., & Molero, J. (2013). *CAMBIO CLIMÁTICO, FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS Y ANÁLISIS DE RIESGOS*. Obtenido de XV Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica:

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/78301609/Cambio_climato_fenomenos_meteorologicos_extremos_analis_de_riesgos_2013-libre.pdf?1641574817=&response-content-

disposition=inline%3B+filename%3DCambio_Climatico_Fenomenos_Meteorologico.pdf&Expires=1745547501&

IPCC. (2022). *Cambio climático 2022: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

ISO 14090: 2019. *Adaptation to climate change—Principles, requirements and guidelines*.

KAIEN SOFTWARE. (25 de Abril de 2024). *Ciudades Resilientes: tecnología ante el cambio climático*. Obtenido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/ciudades-resilientes-tecnolog%C3%ADa-ante-el-cambio-clim%C3%A1tico-raprf/>

Kim, J., Shu, E., Lai, K., Amodeo, M., Porter, J., & Kearns, E. (2022). Assessment of the standard precipitation frequency estimates in the United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101276.

Knapik, E., Brandimarte, L., & Usher, M. (2025). Maintenance in sustainable stormwater management: issues, barriers and challenges. *Journal of Environmental Planning and Management*, 68(12), 2769-2795.

Kourtis, I. M., & Tsihrintzis, V. A. (2021). Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review. *Science of the Total Environment*, 771, 145431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145431>

LaRoss, D. (2015). EPA Outlines Options For Small MS4 Permits But Raises Cost Concerns. *Inside EPA's Water Policy Report*, 24(26), 7-9. <https://www.jstor.org/stable/26839193>

Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Costa, C., Trujillo, C., Garcés, G., . . . Pittelkow, C. (22 de Noviembre de 2024). *Identifying rice varieties for mitigating methane and nitrous oxide emissions under intermittent irrigation*. doi:10.1016/j.jenvman.2024.123376

- Macea, F., & Hernández, S. (2014). *Investigación para el desarrollo de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la ciudad de Bogotá*. Obtenido de Universidad Católica de Colombia: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/be5c747b-c983-44fb-b401-9d67ea9da747/content>
- Manandhar, B., Cui, S., Wang, L., & Shrestha, S. (6 de Marzo de 2023). *Urban Flood Hazard Assessment and Management Practices in South Asia: A Review*. doi:10.3390/land12030627
- Mark, J. (7 de Octubre de 2020). *Civilización del valle del Indo*. Obtenido de https://www.worldhistory.org/trans/es/1-10070/civilizacion-del-valle-del-indo/?utm_source=google.com
- Merlinski, M., & Tobías, M. (Abril de 2016). *Inundaciones y construcción social del riesgo en Buenos Aires. Acciones colectivas, controversias y escenarios de futuro*. Obtenido de Scielo: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-25082016000100004
- Milly, P., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R., Kundzewicz, Z., Lettenmaier, D., . . . Krysanova, V. (1 de Septiembre de 2015). *On Critiques of “Stationarity is Dead: Whither Water Management?”*. doi:10.1002/2015WR017408
- Moreno, A. (Junio de 2016). *Estimación de caudales máximos empleando el modelo HEC-HMS*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/317922671/PRESENTACION-HEC-HMS?>
- Munzhedzi, L., Mugari, E., Nethengwe, N., & Gumbo, A. (18 de Septiembre de 2024). *Trends in extreme rainfall and their relationship to flooding episodes in Vhembe district, South Africa*. doi:10.1088/2515-7620/ad7702

- Muwafu, S., Rolfer, L., Scheffran, J., & Mánez, M. (25 de Abril de 2024). *A framework for assessing social structure in community governance of sustainable urban drainage systems: insights from a literature review*. doi:10.1007/s11027-024-10136-2
- Nowakowka, M., Wartalska, K., Kazmierczak, B., & Kotowski, A. (13 de Febrero de 2019). *Verification of the Stormwater Drainage System Overloads in Wrocław for an Assessment of Climate Change Effects*. doi:10.3311/PPci.12668
- NYC Environmental Protection. (2013). *NYC Green Infrastructure*. Obtenido de <https://www.nyc.gov/assets/dep/downloads/pdf/water/stormwater/green-infrastructure/gi-annual-report-2013.pdf>
- Okba, E., Zareef, A., & Sabry, N. (21 de Julio de 2024). *Un marco para la planificación de la resiliencia al cambio climático en redes de agua y drenaje (un estudio de caso de Alejandría)*. Obtenido de Horizon Research Publishing Corporation: https://www.hrpublishing.org/journals/article_info.php?aid=14387
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (28 de Marzo de 2025). *Organización Meteorológica Mundial*. Obtenido de Organización Meteorológica Mundial: <https://wmo.int/es/media/news/los-fenomenos-meteorologicos-y-climaticos-extremos-castigan-america-latina-y-el-caribe>
- Organización Meteorológica Mundial. (2022). *Estado del clima en América Latina y el Caribe en 2022*. Obtenido de https://mexico.un.org/sites/default/files/2023-07/1322_State_of_the_Climate_in_LAC_2022_es_0.pdf#:~:text=provocados%20por%20lluvias%20intensas%20causaron,Las%20condiciones%20prolongadas%20de%20sequ%C3%ADa

- Ortega, A., Sörensen, J., Rodríguez, J., & Bharati, L. (6 de Junio de 2023). *Hydrologic–hydraulic assessment of SUDS control capacity using different modeling approaches: a case study in Bogotá, Colombia*. (W. S. 3124–3145, Editor) doi:10.2166/wst.2023.173
- Osman, M., Bodnariuk, N., Solmon, S., Coppola, E., & Faranda, D. (7 de Marzo de 2025). *Heavy rain in March 2025 Argentina floods mostly strengthened by human-driven climate change*. Obtenido de ClimaMeter, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS: <https://www.climameter.org/20250307-argentina-floods>
- Paredes-Tavares, J., Gómez-Albores, M., Mastachi-Loza, C., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H., & M., K. (2 de Marzo de 2018). *Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin*. doi:10.3390/w10030258
- PCQ. (2013). *Historia del drenaje*. Obtenido de <https://pcqro.com.mx/recomendaciones/historia-del-drenaje/>
- Pearson, L., & Pelling, M. (2015). The UN Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030: Negotiation process and prospects for science and practice. *Journal of Extreme Events*, 2(01), 1571001. <https://doi.org/10.1142/S2345737615710013>
- Pedersen, A. N. (2022). The digital twin of urban drainage systems—dynamic models and measurements for error diagnosis.
- Pérez- Corredor, L., Hume, S., Alivio, M., & Bezak, N. (18 de Diciembre de 2024). *Exploring the Impact of Nature-Based Solutions for Hydrological Extremes Mitigation in Small Mixed Urban-Forest Catchment*. doi:10.3390/app142411813
- Perumal, M., & Sahoo, B. (2010). *Real-Time Flood Forecasting by a Hydrometric Data-Based Technique*. (D. Springer, Ed.) doi:10.1007/978-90-481-2498-5_9

- Pervin, I., Mahbubur, S., Nepal, M., Enamul, A., Karim, H., & Dhakal, G. (2020). *Adapting to urban flooding: a case of two cities in South Asia*. doi:10.2166/wp.2019.174
- Pons, V., Stromberg, M., Blecken, G.-T., Tscheikner, F., Viklander, M., & Muthanna, T. (3 de Junio de 2024). *Embracing epistemic uncertainty: a risk evaluation method for pollutants in stormwater*. Obtenido de Water Science & Technology: <https://iwaponline.com/wst/article/90/1/398/102753/Embracing-epistemic-uncertainty-a-risk-evaluation>
- Ramiamanana, F. N., & Teller, J. (2021). Urbanization and Floods in Sub-Saharan Africa: Spatiotemporal Study and Analysis of Vulnerability Factors—Case of Antananarivo Agglomeration (Madagascar). *Water*, 13(2), 149. <https://doi.org/10.3390/w13020149>
- Rangari, V., Sai, S., Nanduri, U., & Patel, A. (Marzo de 2018). *Simulation of Urban Drainage System using a Storm Water Management Model (SWMM)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/323993331_Simulation_of_Urban_Drainage_System_using_a_Storm_Water_Management_Model_SWMM
- Revista Contacto & Universidad de los Andes. (2025). *Drenajes Urbanos Inteligentes*. Universidad de los Andes. <https://www.uniandes.edu.co/es/noticias/ingenieria/drenajes-urbanos-inteligentes>
- Reyes-Silva, J. D., Bangura, E., Helm, B., Benisch, J., & Krebs, P. (2020). The role of sewer network structure on the occurrence and magnitude of combined sewer overflows (CSOs). *Water*, 12(10), 2675. <https://doi.org/10.3390/w12102675>
- Rojas, X., Sierra-Correa, P., Arias, F., & Rangel-Buitrago, N. (Diciembre de 2013). *Impactos del cambio climático en Cartagena de Indias, Colombia*. Obtenido de

[https://www.researchgate.net/publication/276060053_Impactos_del_cambio_climatico_e
n_Cartagena_de_Indias_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/276060053_Impactos_del_cambio_climatico_en_Cartagena_de_Indias_Colombia)

Román, V. (14 de Marzo de 2025). *Cambio climático: cómo tienen que prepararse las ciudades de América Latina ante lluvias intensas más frecuentes*. Obtenido de

[https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2025/03/15/cambio-climatico-como-
tienen-que-prepararse-las-ciudades-de-america-latina-ante-lluvias-intensas-mas-
frecuentes/#:~:text=Ya%20hay%20pruebas%20de%20que,infraestructura%20y%20el%2
0deterioro%20ambient](https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2025/03/15/cambio-climatico-como-tienen-que-prepararse-las-ciudades-de-america-latina-ante-lluvias-intensas-mas-frecuentes/#:~:text=Ya%20hay%20pruebas%20de%20que,infraestructura%20y%20el%20deterioro%20ambient)

Rotoplas. (2018). *Sistema de captación de agua pluvial Rotoplas y sus beneficios*. Rotoplas.

[https://rotoplas.com.mx/blog/sistema-de-captacion-de-agua-pluvial-rotoplas-y-sus-
beneficios/](https://rotoplas.com.mx/blog/sistema-de-captacion-de-agua-pluvial-rotoplas-y-sus-beneficios/)

Saldarriaga, J. (2016). *Estimación de caudales de escorrentía urbana usando sistemas de información geográfica*. Obtenido de

[https://civilyambiental.uniandes.edu.co/es/profesores/juan-guillermo-saldarriaga-
valderrama](https://civilyambiental.uniandes.edu.co/es/profesores/juan-guillermo-saldarriaga-valderrama)

Schwat, E., Istanbuluoglu, E., Horner-Devine, A., Anderson, S., Knuth, F., & Shean, D. (5 de Julio de 2023). *Multi-decadal erosion rates from glacierized watersheds on Mount Baker, Washington, USA, reveal topographic, climatic, and lithologic controls on sediment yields*. doi:10.1016/j.geomorph.2023.108805

Serrano-Núñez, V., Villagra-Mendoza, K., Gamboa-Alpízar, N., Miranda-Quirós, M., &

Watson-Hernández, F. (10 de Diciembre de 2024). *Evaluation of the Hydrological Response of Nature-Based Solutions (NBS) in Socio-Economically Vulnerable Tropical*

Urban Settlements: A Case Study in La Guapil, Costa Rica, Under Climate Change

Scenarios. doi:10.3390/su162410794

Sette, A. (2021, August 9). *Hacia arriba, hacia adentro o hacia afuera: ¿cómo crecen las ciudades?* ArchDaily Colombia. Retrieved September 1, 2025, from <https://www.archdaily.co/co/966305/hacia-arriba-hacia-adentro-o-hacia-afuera-como-crecen-las-ciudades>

Shutterstock. (2023). *El pavimento permeable como uso poroso de material para el diagrama de esquema de capas de carreteras. Esquema educativo etiquetado con flujo a través de la estructura del suelo para la ilustración vectorial de drenaje de agua de tormentas o inundaciones*. Shutterstock. <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/permeable-pavement-porous-material-usage-road-2294548077>

Shen, Y., Tahvildari, N., Morsy, M., Huxley, C., Chen, D., & Lee, J. (25 de Mayo de 2022). *Dynamic Modeling of Inland Flooding and Storm Surge on Coastal Cities under Climate Change Scenarios: Transportation Infrastructure Impacts in Norfolk, Virginia USA as a Case Study*. doi:10.3390/geosciences12060224

SMN Gobierno de Argentina. (2025). *Argentina Gobierno*. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/smn>

SMN Gobierno de México. (2025). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

Song, L., Yan, L., Chai, F., Lu, F., Zhai, J., Luan, Q., . . . Sun, J. (1 de Marzo de 2025). *Future projections of the rainfall intensity-duration-frequency curves in Beijing-Tianjin-Hebei*

urban agglomeration based on NEX-GDDP CMIP6 simulations.

doi:10.1016/j.scs.2025.106227

Strategic Risk Global. (13 de Septiembre de 2023). *Case study: Enhancing urban resilience in Medellín through insurance protection for climate risks*. Obtenido de

<https://www.strategic-risk-global.com/catastrophe-risk/case-study-enhancing-urban-resilience-in-medellin-through-insurance-protection-for-climate-risks/1445599.article>

Texas Department of Transportation. (2020). *Hydraulic Design Manual: Rational Method*.

Obtenido de

https://onlinemanuals.txdot.gov/TxDOTOnlineManuals/TxDOTManuals/hyd/rational_method.htm

Trenberth, K. (31 de Marzo de 2011). *Changes in precipitation with climate change*.

doi:10.3354/cr00953

UNESCO & WMO. (2012). *Glosario hidrológico internacional (3.ª ed.)*. UNESDOC Biblioteca

Digital. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862/PDF/221862qaa.pdf.multi>

U.S. Environmental Protection Agency. (2013). *Soak Up the Rain: What's the Problem?*

Obtenido de <https://www.epa.gov/soakuptherain/soak-rain-whats-problem>

Valencia Ventura, F., & Guevara Pérez, E. (2014). Validación del modelo HEC HMS en la

cuenca del río Cabriales para el análisis hidrológico. *Ingeniería UC*, 21(1), 36-49.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70732642005?>

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L., Villalba, R., Pitte, P., . . . Zalazar, L. (9 de Mayo de 2019). *Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile*.

doi:10.3389/fenvs.2019.00069

- Vitoviz, J. (2023). *HISTORIA DEL ACUEDUCTO*. Obtenido de https://www.academia.edu/9592356/HISTORIA_DEL_ACUEDUCTO?utm_source=google.com
- Volpi-León, V., Seck-Tuoh-Mora, J., Bigurra-Altazi, C., Juárez-Sedano, A., & Lizárraga-Mendiola, L. (31 de Diciembre de 2024). *Design of Urban Indicators to Optimize the Implementation of Low-Impact Techniques in Semi-Arid Cities*. doi:10.3390/app15010294
- Vorobevskii, I., Janabi, F., Schneebeck, F., Bellera, J., & Krebs, P. (24 de Junio de 2020). *Urban Floods: Linking the Overloading of a Storm Water Sewer System to Precipitation Parameters*. doi:10.3390/hydrology7020035
- Wang, J., Wah Yu, C., & Cao, S.-J. (2022). Urban development in the context of extreme flooding events. *Journal of Flood Management and Water Science*, 31(1). <https://doi.org/10.1177/1420326X211048577>
- Wartalska, K., & Kotowski, A. (21 de Junio de 2020). *Model Hyetographs of Short-Term Rainfall for Wrocław in the Perspective of 2050*. doi:10.3390/atmos11060663
- Whirworth-Hulse, J., Jobbágy, E., Borrás, L., Alsina, S., Houspanossian, J., & Nosetto, M. (6 de Marzo de 2023). *The expansion of rainfed grain production can generate spontaneous hydrological changes that reduce climate sensitivity*. doi:10.1016/j.agee.2023.108440
- World Health Organization. (2006). *WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater Excreta and Greywater*. Obtenido de [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=01B64IJhqY0C&oi=fnd&pg=PP2&dq=World+Health+Organization+\(WHO\)+\(2006\).+Guidelines+for+the+safe+use+of+was](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=01B64IJhqY0C&oi=fnd&pg=PP2&dq=World+Health+Organization+(WHO)+(2006).+Guidelines+for+the+safe+use+of+was)

- tewater,+excreta+and+greywater.&ots=jUkLwYeOYG&sig=IFkiJ4-
EsDmNWfpM000mklHj43Q#v=onepage&q=World%20Healt
- Xu, H., Fu, G., Ye, Q., Lyu, M., & Yan, X. (28 de Agosto de 2024). *Life cycle environmental impacts of urban water systems in China*. Obtenido de <https://www-sciencedirect-com.sibdigital.ufpso.edu.co/science/article/pii/S0043135424012491?via%3Dihub>
- Ye, C., Duc, T., Xu, X., Stewart, C., Arias, M., Zhang, Y., & Zhang, Q. (31 de Mayo de 2023). *Coupled effects of future rainfall and land use on urban stormwater drainage system in Tampa, Florida (USA)*. doi:10.1016/j.ecolind.2023.110402
- Zimmermann, E., Bracalenti, L., Piacentini, R., & Inostroza, L. (18 de Octubre de 2016). *Urban Flood Risk Reduction by Increasing Green Areas for Adaptation to Climate Change*. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.822
- Zubelzu, S., Rodríguez-Sinobas, L., Sordo-Ward, A., Pérez-Dúran, A., & Cisneros-Almazán, R. (16 de Marzo de 2020). *Multi-Objective Approach for Determining Optimal Sustainable Urban Drainage Systems Combination at City Scale. The Case of San Luis Potosí (México)*. doi:10.3390/w12030835
- Associated Press. (2018). *AP Explica: ¿Cómo se forma una marejada ciclónica?* America Noticias Diario Miami. <https://www.americateve.com/eeuu/ap-explica-como-se-forma-una-marejada-ciclonica-n1002961>
- Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias (ERCC). (2019). *ECHO Daily Flash Archive*. ERCC PORTAL. <https://erccportal.jrc.ec.europa.eu/ECHO-Products/Echo-Flash/ECHO-Flash-old/ECHO-Flash-List/yy/2019/mm/2>

CNN. (2018). *El huracán María habría dejado más de 4.600 personas muertas en Puerto Rico: superando en miles las cifras oficiales*. Cable News Network.

<https://cnnespanol.cnn.com/2018/05/29/huracan-maria-muertos-puerto-rico-cifra-total-harvard-estudio>

Deutsche Welle. (2021). *Lluvias en Brasil dejan más de 400 mil afectados*. DW.

<https://www.dw.com/es/lluvias-en-brasil-dejan-m%C3%A1s-de-400-mil-afectados/a-60261834>

DW. (2023). *14 muertos y 120 desaparecidos en inundaciones en la India*. DW.

<https://www.dw.com/es/14-muertos-y-120-desaparecidos-en-inundaciones-en-la-india/a-67007679>

Ferrer, J. L. (2025). *El derretimiento de un glaciar inunda la capital de Alaska: cientos de casas*

afectadas. El Periodico. <https://www.elperiodico.com/es/medio-ambiente/20250822/derretimiento-glaciar-inunda-capital-alaska-120844809>

Grupo Banco Mundial. (2025). *Crecimiento de la población urbana (% anual) - Latin America & Caribbean*. Grupo Banco Mundial.

https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.GROW?end=2020&locations=ZJ&most_recent_year_desc=false&start=1961&type=shaded&view=map&year=2022

IFRC. (2024). *Brasil: Inundaciones en Rio Grande do Sul*. La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC).

<https://www.ifrc.org/es/emergency/brasil-inundaciones-en-rio-grande-do-sul>

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2022, December 6). *Central America: Hurricanes Eta & Iota - Final Report (MDR43007) - Guatemala*. ReliefWeb.

- Retrieved August 29, 2025, from <https://reliefweb.int/report/guatemala/central-america-hurricanes-eta-iota-final-report-mdr43007>
- Luis Martin. (2015). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS*. Hidrología Sostenible. <https://www.hidrologiasostenible.com/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-suds/>
- Marengo, J.A., Alcantara, E., Cunha, A.P., Seluchi, M., Nobre, C.A., Dolif, G., Goncalves, D., Assis Dias, M., Cuartas, L.A., Bender, F., Ramos, A.M., Mantovani, J.R., Alvalá, R.C., & Moraes, O.L. (2023). *Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness* (Vol. Volume 39). Weather and Climate Extremes. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>.
- Metych, M. (2025, August 21). *Hurricane Irma | Path, Damage, Category, Wind Speed, Death Toll, & Recovery*. Britannica. Retrieved August 28, 2025, from <https://www.britannica.com/event/Hurricane-Irma-2017>
- NASA. (2016). *Hurricane Matthew Soaks Haiti*. NASA Earth Observatory. Retrieved August 28, 2025, from <https://earthobservatory.nasa.gov/images/88893/hurricane-matthew-soaks-haiti>
- NASA. (2021, August 11). *Tras los históricos huracanes Eta e Iota, la NASA ayuda a preparar a Centroamérica para los próximos desastres*. NASA. Retrieved August 29, 2025, from <https://www.nasa.gov/es/tras-los-hist%C3%B3ricos-huracanes-eta-e-iota-la-nasa-ayuda-a-preparar-a-centroam%C3%A9rica-para-los-pr%C3%B3ximos-desastres/>
- Oates, L. E., Dai, L., Sudmant, A., & Gouldson, A. (2020). Building climate resilience and Water Security in Cities: Lessons from the sponge city of Wuhan, China.

OCHA. (2025). *Latinoamérica y El Caribe Resumen de Situación Semanal al 13 de junio 2025*.

reliefweb. <https://reliefweb.int/report/mexico/latinoamerica-y-el-caribe-resumen-de-situacion-semanal-al-13-de-junio-2025>

OCHA. (2025). *Latinoamérica y El Caribe Resumen de Situación Semanal al 20 de junio 2025*.

OCHA. <https://www.unocha.org/publications/report/haiti/latinoamerica-y-el-caribe-resumen-de-situacion-semanal-al-20-de-junio-2025>

OCHA. (2025). *Latinoamérica y El Caribe Resumen de Situación Semanal al 30 de junio 2025*.

OCHA. <https://www.unocha.org/publications/report/mexico/latinoamerica-y-el-caribe-resumen-de-situacion-semanal-al-30-de-junio-2025>

OCHA, Naciones Unidas en México, & Equipo Técnico de Emergencias del Sistema de Las

Naciones Unidas (UNETE). (2024). *México: Huracán Otis - Hacia la recuperación -*

Con información recibida hasta el 27 de noviembre de 2023. OCHA.

[https://www.unocha.org/publications/report/mexico/mexico-huracan-otis-hacia-la-](https://www.unocha.org/publications/report/mexico/mexico-huracan-otis-hacia-la-recuperacion-con-informacion-recibida-hasta-el-27-de-noviembre-de-2023#:~:text=El%2025%20de%20octubre%20de,dej%C3%B3%20poco%20tiempo%20para%20prepararse)

[recuperacion-con-informacion-recibida-hasta-el-27-de-noviembre-de-](https://www.unocha.org/publications/report/mexico/mexico-huracan-otis-hacia-la-recuperacion-con-informacion-recibida-hasta-el-27-de-noviembre-de-2023#:~:text=El%2025%20de%20octubre%20de,dej%C3%B3%20poco%20tiempo%20para%20prepararse)

[2023#:~:text=El%2025%20de%20octubre%20de,dej%C3%B3%20poco%20tiempo%20para%20prepararse](https://www.unocha.org/publications/report/mexico/mexico-huracan-otis-hacia-la-recuperacion-con-informacion-recibida-hasta-el-27-de-noviembre-de-2023#:~:text=El%2025%20de%20octubre%20de,dej%C3%B3%20poco%20tiempo%20para%20prepararse).

Organización Internacional para las Migraciones (OIM). (2016, Octubre 29). *La OIM y la OFDA*

ayudan a 40.000 familias afectadas por el huracán Matthew en Haití. OIM ONU

MIGRACIÓN. [https://www.iom.int/es/news/la-oim-y-la-ofda-ayudan-40000-familias-](https://www.iom.int/es/news/la-oim-y-la-ofda-ayudan-40000-familias-afectadas-por-el-huracan-matthew-en-haiti)

[afectadas-por-el-huracan-matthew-en-haiti](https://www.iom.int/es/news/la-oim-y-la-ofda-ayudan-40000-familias-afectadas-por-el-huracan-matthew-en-haiti)

Revista Contacto & Universidad de los Andes. (2025). *Drenajes Urbanos Inteligentes*.

Universidad de los Andes. <https://www.uniandes.edu.co/es/noticias/ingenieria/drenajes-urbanos-inteligentes>

- Rotoplas. (2018). *Sistema de captación de agua pluvial Rotoplas y sus beneficios*. Rotoplas.
<https://rotoplas.com.mx/blog/sistema-de-captacion-de-agua-pluvial-rotoplas-y-sus-beneficios/>
- Sette, A. (2021, August 9). *Hacia arriba, hacia adentro o hacia afuera: ¿cómo crecen las ciudades?* ArchDaily Colombia. Retrieved September 1, 2025, from
<https://www.archdaily.co/co/966305/hacia-arriba-hacia-adentro-o-hacia-afuera-como-crecen-las-ciudades>
- UNDRR & OCHA. (2023). *Panorama de los desastres en América Latina y el Caribe 2000-2022*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.undrr.org/media/89902/download?startDownload=20250828>
- Verbeiren, B., Seyoum, S. D., Lubbad, I., Xin, T., ten Veldhuis, M. C., Onof, C., ... & Willems, P. (2018, September). FloodCitiSense: Early warning service for urban pluvial floods for and by citizens and city authorities. In *International Conference on Urban Drainage Modelling* (pp. 660-664). Cham: Springer International Publishing.
- Wang, L., Huang, Z., Gan, B., Zhang, Z., Fu, H., Fang, D., ... & Dong, X. (2024). Climate change impacts on magnitude and frequency of urban floods under scenario and model uncertainties. *Journal of Environmental Management*, 366, 121679.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121679>
- Zheng, X., Zou, Y., Lounsbury, A. W., Wang, C., & Wang, R. (2021). Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105577.

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algarañaz, E.D., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2012). Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38(2), 61-74. <https://doi.org/10.18172/cig.2867>
- Associated Press. (2018). *AP Explica: ¿Cómo se forma una marejada ciclónica?* America Noticias Diario Miami. <https://www.americateve.com/eeuu/ap-explica-como-se-forma-una-marejada-ciclonica-n1002961>
- Centro de Coordinación de Respuesta a Emergencias (ERCC). (2019). *ECHO Daily Flash Archive*. ERCC PORTAL. <https://erccportal.jrc.ec.europa.eu/ECHO-Products/Echo-Flash/ECHO-Flash-old/ECHO-Flash-List/yy/2019/mm/2>
- CNN. (2018). *El huracán María habría dejado más de 4.600 personas muertas en Puerto Rico: superando en miles las cifras oficiales*. Cable News Network. <https://cnnespanol.cnn.com/2018/05/29/huracan-maria-muertos-puerto-rico-cifra-total-harvard-estudio>
- Yu, X., & Zhang, J. (2023). The Application and Applicability of HEC-HMS Model in Flood Simulation under the Condition of River Basin Urbanization. *Water*, 15(12), 2249. <https://doi.org/10.3390/w15122249>