

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-03-10

Notas

Gestión de aguas pluviales y sustentabilidad urbana.

Una revisión

Stormwater management and urban sustainability. A review

Natyely Barranco-Mejía¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-1111>

Fredy López-Pérez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1372-6252>

María del Carmen Torres-Salazar³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2119-8998>

Pedro Misael Albornoz-Góngora⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1242-1051>

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México, bmno100417@upemor.edu.mx

²Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, jflopez@udemedellin.edu.co

³Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México, mariadelcarmenatorress@gmail.com

⁴Comisión Nacional del Agua, Tlaxcala, México, ptrsmsl@gmail.com



Autora para correspondencia: Natyely Barranco-Mejía,
bmno100417@upemor.edu.mx

Resumen

Uno de los efectos ambientales más conocidos de las ciudades es que inducen a la impermeabilización de suelos que a su vez incrementan los impactos del calentamiento global. La construcción de infraestructura, como calles y banquetas hechas de pavimento o concreto propician una disrupción entre las actividades de la población y el ciclo hidrológico natural. El cambio de uso de suelo y la extracción para el abastecimiento de agua potable sin criterios de sostenibilidad urbana agrava la situación en muchas ciudades del mundo.

Para el desarrollo de este trabajo se efectuó una lectura comparada sobre el manejo de las aguas pluviales en los contextos del ciclo integral del agua urbana y la sostenibilidad. Se revisaron 61 artículos que permiten observar que los sistemas urbanos de drenaje sustentable son una alternativa esencial para contrarrestar los efectos del cambio climático y mitigar las variaciones importantes en la distribución de los patrones de pluviosidad anual en diferentes regiones, especialmente en ciudades latinoamericanas.

Palabras clave: sistemas urbanos de drenaje sustentable, sostenibilidad urbana, cambio climático, drenajes urbanos, gestión de aguas pluviales urbanas, resiliencia urbana.

Abstract

One of the best-known environmental effects of cities is that they induce soil impermeabilization, which in turn increases the impacts of global warming. The construction of infrastructures, such as streets and sidewalks made of pavement or concrete, leads to disruption between the population's activities and the natural hydrological cycle. The change in land use and extraction for drinking water supply without urban sustainability criteria aggravates the situation in many cities around the world.

In the development of the review article, a comparative reading was made on the management of rainwater in the contexts of the integral urban water cycle and sustainability; 61 records were reviewed that allow observation that Sustainable Urban Drainage Systems are an essential alternative to counteract the effects of climate change, and although they imply a challenge of implementation, their development is necessary to mitigate the important variations in the distribution of annual rainfall patterns in different regions, especially for Latin American cities.

Keywords: Sustainable urban drainage systems, urban sustainability, climate change, urban drainage, urban storm-water management, urban resilience.

Recibido: 14/10/2021

Aceptado: 21/08/2022

Publicado Online: 27/09/2022



Introducción

Durante la revisión de libros y artículos de diversos autores, los temas de desarrollo y análisis incluyen el ciclo hidrológico y la forma en que se ve afectado por la urbanización, así como los fundamentos del sistema del alcantarillado actual y sus desventajas, la evolución del ciclo urbano del agua, su manejo integral, el enfoque sociopolítico, institucional y legal respecto de su manejo sustentable, el manejo del agua en ciudades resilientes y los retos ambientales del drenaje urbano.

Al profundizar en estos temas se demostró que un factor importante a considerar es el comportamiento de las lluvias para desarrollar planes efectivos en el diseño de sistemas de drenaje urbano, donde existen diversos criterios que pueden ayudar a definir la sostenibilidad urbana asociada con la gestión del recurso hídrico (Gomes-Miguez, Moura-Rezende, & Pires-Veról, 2015; Potter & Vilcan, 2020).

La urbanización incrementa el cambio de los suelos a superficies cada vez más impermeables, lo que altera el ciclo hidrológico urbano, provocando un aumento en el volumen del escurrimiento superficial y el caudal pico. Es importante mencionar que durante el proceso de urbanización, la construcción de drenajes convencionales y alcantarillas, cuyo objetivo principal es la rápida eliminación de las aguas pluviales de zonas urbanas, generan algunos efectos no deseados, como la disminución de la calidad del agua (Mguni, Herslund, & Jensen, 2016). Lo anterior también desencadena otras consecuencias, como la disminución

de la infiltración de agua pluvial y, por ende, la reducción en la recarga de los acuíferos (Peña-Guzmán, Melgarejo, & Prats, 2016).

Sin embargo, el desarrollo urbano no puede interrumpirse en su totalidad por dichos factores ambientales. Es necesario concientizar a la población de que éste es un problema actual y prioritario por resolver (Brears, 2016).

Para afrontar esos retos actualmente se está desarrollando un tipo de ingeniería llamada Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentables (SUDS), término que proviene del Reino Unido, y que implica un conjunto de prácticas y montaje de infraestructura para el control de escurrimientos pluviales y sus efectos.

También se les puede conocer como BMPs en EUA (*Best Management Practices*) (Castro-Fresno, Rodríguez-Bayón, Rodríguez-Hernández, & Ballester-Muñoz, 2005); Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) o Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TDUS) en España y algunos países hispanoparlantes; Técnicas Alternativas de Drenaje (TAD) en Chile (Castro-Fresno *et al.*, 2005; Momparler & Andrés-Doménech, 2015; Rodríguez, 2008); LID (*Low Impact Development*), WSUD (*Water Sensitive Urban Design*) en Australia, y LIUDD (*Low Impact Urban Design and Development*) en Nueva Zelanda (Elliot & Trowsdale, 2007). Entre los diferentes componentes de drenaje desarrollados están las cunetas, zanjas y áreas de infiltración.

Tratándose de los SUDS, éstos han influido en el desarrollo de bajo impacto con innovación, demostrando que conforme pasa el tiempo incrementan su popularidad en diferentes países como Reino Unido, España, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Francia, EUA y Suecia;

además, un principio fundamental de los SUDS es mantener un posdesarrollo hidrológico de un sitio para cumplir con condiciones similares al comportamiento natural de terrenos sin modificaciones antrópicas (Neupane, 2018).

Esta revisión es uno de los resultados de una tesis de maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables sobre el diseño de áreas de infiltración de camellones y su evaluación del funcionamiento del sistema, según criterios de sustentabilidad urbana en la ciudad de Cuernavaca, Morelos (México); destaca las ventajas de implementar tales proyectos, que contribuyen al desarrollo urbano sustentable para impulsar la infiltración del agua pluvial con previo tratamiento al subsuelo de las zonas urbanas, que contribuyen a la visión holística de promover el manejo integral de las aguas pluviales en las áreas urbanas.

Materiales y métodos

Para esta revisión de literatura primero se planteó una ecuación de búsqueda con los siguientes términos «("sustainable drainage system*" OR rainwater) AND ("urban sustain*" OR "sustain* cities")», después se recurrió a las bases de datos Web of Science, Scopus y EbscoHost, usando filtros de temporalidad, campo temático, tipos de documento donde se eligieron los artículos científicos, monográficos y de datos, materiales de editorial y libros. Con lo anterior se identificaron un total de 377 documentos, que luego se analizaron con el algoritmo Tree of Science, disponible en la página <https://tos.coreofscience.com/> para optimizar la

búsqueda y la selección de los documentos, lo cual permitió focalizar el análisis de un total de 40 libros y artículos.

Tras dicha selección se analizó cualitativamente el contenido de cada artículo y libro utilizando la herramienta computacional ATLAS.ti para establecer las ideas centrales de la revisión.

En este trabajo se emplea la metodología comparativa y posteriormente se sintetizan, clasifican e interpretan los aportes de los diferentes autores y de los estados del arte que están relacionados con la temática de esta revisión.

Literatura y material analizado

Durante la revisión de literatura principalmente se identificaron los siguientes autores como los más relevantes: M. G. Faram, Sara Perales Momparler, Ignacio Andrés-Doménech, R. R. Brown, Megan Farrelly, Alexander Elliott, Sam Trowsdale, Patricia Göbel, Christos Makropoulos, V. Grace Mitchell, Allison H. Roy, David Butler, John W. Davies, Edgar L. Villarreal, Andrew Dixon y T. H. F. Wong.

Las principales revistas en las que se publican los contenidos de interés para esta revisión son *IWA Publishing Water Science & Technology—WST*; *Elsevier Environmental Modelling & Software*; *Elsevier Journal of Contaminant Hydrology*; *Springer Science + Business Media*; *Taylor & Francis Group Urban Water Journal*, *Elsevier Water Policy*, y *Elsevier Building and Environment*.

Los principales países de afiliación de los autores con publicaciones más relevantes en la temática son Reino Unido, España, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Francia, EUA y Suecia.

Con respecto al tema del drenaje urbano, en la sección siguiente se expone un análisis que detalla los criterios para sustentar sus ventajas y desventajas, así como su desarrollo e implementación.

Resultado del análisis

El ciclo hidrológico y sus modificaciones

Es importante comprender el ciclo completo del agua y sus mecanismos para optimizar su gestión en las zonas urbanas. El ciclo hidrológico detalla la presencia y actividad continua del agua en la Tierra a medida que se mueve y cambia de forma constante.

Sin embargo, las zonas urbanas modifican el ciclo hidrológico porque las precipitaciones tienden a remover material particulado del aire; el agua se escurre por techos y pavimentos arrastrando partículas contaminantes, así como sólidos en suspensión, materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos hasta llegar al suelo. En la ciudad, las áreas vegetales de intercepción son restringidas y las intervenciones humanas en el espacio inducen a que el suelo tenga limitada permeabilidad.

Como consecuencia, se observa incremento en las velocidades de los escurrimientos superficiales sobre superficies firmes y sólidas, al igual

que por canalones y pavimentos, concentrándose en poco tiempo en los sistemas de alcantarillado. Esto contrasta con el movimiento que tendría sobre superficies naturales y a lo largo de corrientes naturales. Por lo tanto, el flujo llega y se desaloja rápido, y el caudal pico es mayor, lo cual reduce la infiltración del agua pluvial a través del suelo y provoca que la recarga a las reservas de aguas subterráneas disminuya de modo sustancial. Es importante mencionar que dicha infiltración de agua debe tener tratamiento previo (Butler & Davies, 2004). Por consiguiente, en las zonas urbanas la infiltración es escasa y los acuíferos locales son parcialmente excluidos del proceso natural del ciclo del agua (Rodríguez, Rodríguez, & Gómez-Ullate, 2007).

En la Figura 1 se muestran estos cambios resultantes de la función del escurrimiento de aguas pluviales, representando un suelo urbanizado y otro no urbanizado.

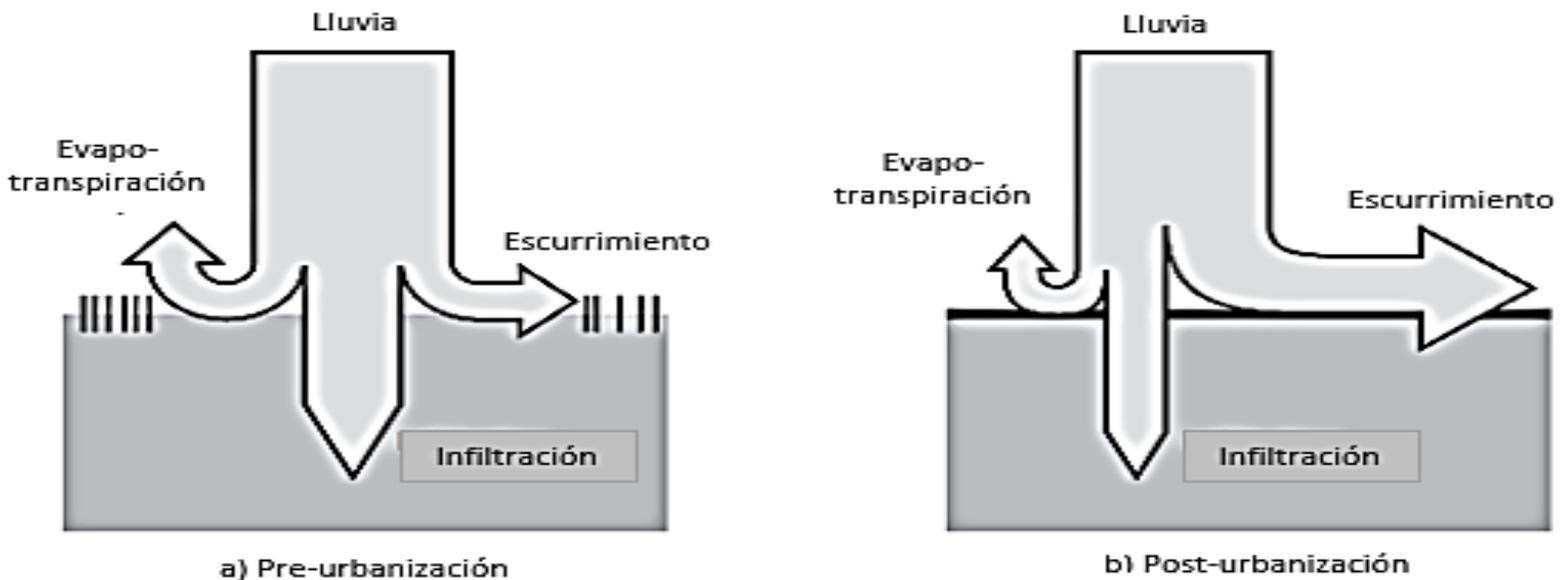


Figura 1. Efecto de la urbanización sobre los escurrimientos de agua pluvial durante los eventos de tormenta. Fuente: Butler y Davies (2004).

Fundamentos del sistema de alcantarillado actual

En el siglo XVI, el sistema de alcantarillado tenía como función captar y transportar aguas residuales y escurrimiento pluvial por una sola red de tuberías para disponerlas hacia un cuerpo de agua cercano. Debido a que era un sistema mixto fue llamado "sistema unitario" (Faram, 2000).

Es común el uso de dicho sistema en ciudades de países europeos y en América Latina, pero con el paso del tiempo algunas de estas redes se han vuelto ineficientes (Scholz & Grabowiecki, 2007).

Un problema conocido de dichas redes es que su capacidad no es suficiente para conducir los caudales generados especialmente por

precipitaciones intensas, las cuales ocasionan desbordamientos o fallas hidráulicas en diferentes puntos del drenaje, provocando inundaciones o extensos encharcamientos en las zonas urbanas (Castro-Fresno *et al.*, 2005; Faram, 2000).

En EUA de América y Australia se implementó en cambio un sistema de alcantarillado diferente, denominado sistema separativo (Faram, 2000), el cual consiste en conducir las aguas residuales por una tubería y los escurrimientos de agua pluvial por otra que además no reciben tratamiento por su baja carga contaminante. Así, solo las aguas residuales son tratadas antes de ser reintroducidas en el ambiente, en lugar de tratarlas junto con aguas pluviales como en otros sistemas.

Aguas pluviales y sustentabilidad urbana

El objetivo de la sustentabilidad es proteger y conservar los recursos naturales, promover distintos estilos de vida y desarrollar infraestructura de apoyo con duración indefinida, evitando el agotamiento de los recursos y la degradación de la calidad ambiental (Wong & Eadie, 2000); por lo tanto, cuantificar u operar la sustentabilidad es un concepto polémico y un proceso ambiguo que se debe abordar a la luz de las características específicas de cada línea de investigación (Natsis, Makropoulos, Liu, Butler, & Memon, 2006).

Actualmente se busca poder cumplir con los objetivos de la sustentabilidad. Por tanto, se han ido generando movimientos internacionales para construir ciudades sustentables, verdes y saludables

que engloben la viabilidad económica y la estabilidad social, a fin de hacer un uso sabio de los recursos (Leitmann, 1999).

Una opción más específica es la transformación de las ciudades convencionales a la idea de Ciudades Sensibles al Agua (CSA), lo cual requerirá una revisión socio-técnica (Wong & Brown, 2009) que implica usar criterios e indicadores enfocados a la sustentabilidad, para medir el óptimo desarrollo urbano. En la Tabla 1 se muestran algunos para mayor claridad:

Tabla 1. Criterios e indicadores para la evaluación de sustentabilidad para proyectos de manejo sustentable urbano del agua.

Capital	Criterio	Indicador
Ambiente	Uso de los recursos	Uso del agua (litros/uso) Pérdida de agua (litros/uso) Uso de energía (kWh/uso) Uso de químicos (litros/uso) Uso de suelo (m ²)
	Prestación de servicios	Prestación de servicios*
	Impacto ambiental	Impacto ambiental*
Economía	Costos del ciclo de vida	Costos del ciclo de la vida*
	Disposición a pagar	Disposición a pagar*
	Asequibilidad	Asequibilidad*
	Exposición a riesgos financieros	Exposición a riesgos financieros*
	Costos de capital (\$)	Costos de capital (\$)
	Costos de operación (\$/l)	Costos de operación (\$/litro)
Social	Riesgos a la salud humana	Riesgos a la salud humana*
	Aceptación	Aceptación*
	Participación/responsabilidad	Participación / responsabilidad*
	Conciencia pública	Conciencia pública*
	Inclusión social	Inclusión social*
Técnico	Escenario	Escenario*
	Confiabilidad	Confiabilidad*
	Durabilidad	Durabilidad*
	Flexibilidad/adaptabilidad	Flexibilidad/adaptabilidad*

*Los indicadores no tienen unidades, ya que cuantifican la sustentabilidad de forma cualitativa.

Fuente: modificada de Makropoulos, Natsis, Liu, Mittas y Butler (2008).

Ciclo integral del agua urbana

Mejorar el sistema de drenaje es indispensable en las zonas urbanas debido a la interacción entre las actividades de la población y el ciclo natural del agua. En esta interacción se deben considerar las formas en que las aguas pluviales, residuales y subterráneas son reguladas y alteradas por las condiciones impuestas por la infraestructura urbana. A la gestión de este conjunto se le denomina Ciclo Integral del Agua Urbana (CIAU) (Mitchell, 2006).

Esta interacción se manifiesta de dos formas principales: primero, la extracción de agua de los ciclos naturales para abastecer a la población; y segundo, los cambios en el uso del suelo y su recubrimiento con superficies impermeables, desviando las aguas pluviales fuera de los sistemas naturales y regionales de drenaje. Ambos impactos antrópicos modifican el clima global, sobre todo los cambios en el régimen de lluvias, por lo que los nuevos diseños de drenaje necesitan tener esto en cuenta (Kabisch, Korn, Stadler, & Bonn, 2017; Graham, 2016).

El alcance actual de la infraestructura del agua en las ciudades está conformado por tres principales componentes: la entrega de agua potable, la infraestructura para el transporte, y el tratamiento de aguas residuales y el drenaje pluvial (Makropoulos *et al.*, 2008).

Evacuar las aguas pluviales con la mínima incomodidad posible para las personas es uno de los objetivos principales de la gestión del agua en las ciudades. Los drenajes tienen además como propósito proteger la salud de las personas, evitar interrumpir las actividades cotidianas, evitar

inundaciones, y proteger de daños a los bienes y asentamientos urbanos de los riesgos generados durante o después de los eventos de tormenta. Actualmente, además de enfocarse en drenar las aguas pluviales de la superficie también se considera importante conservar su calidad y cantidad, porque el escurrimiento puede impactar de forma negativa en los cuerpos de agua a los que se dirige.

Al conocer dichos criterios, el ciclo integral del agua ha tomado relevancia en las ciudades y ha aumentado el interés en métodos más naturales para la disposición de aguas pluviales, incluyendo la infiltración y almacenamiento. La intención general es revertir la tendencia de la tasa de escurrimiento que en las zonas urbanas se incrementa de manera abrupta, en comparación con la tasa de zonas rurales o forestales. En la Figura 2 se muestran los cambios en los caudales que se generan durante eventos de tormenta en tres superficies diferentes como en la rural, semiurbana y urbana (Butler & Davies, 2004).

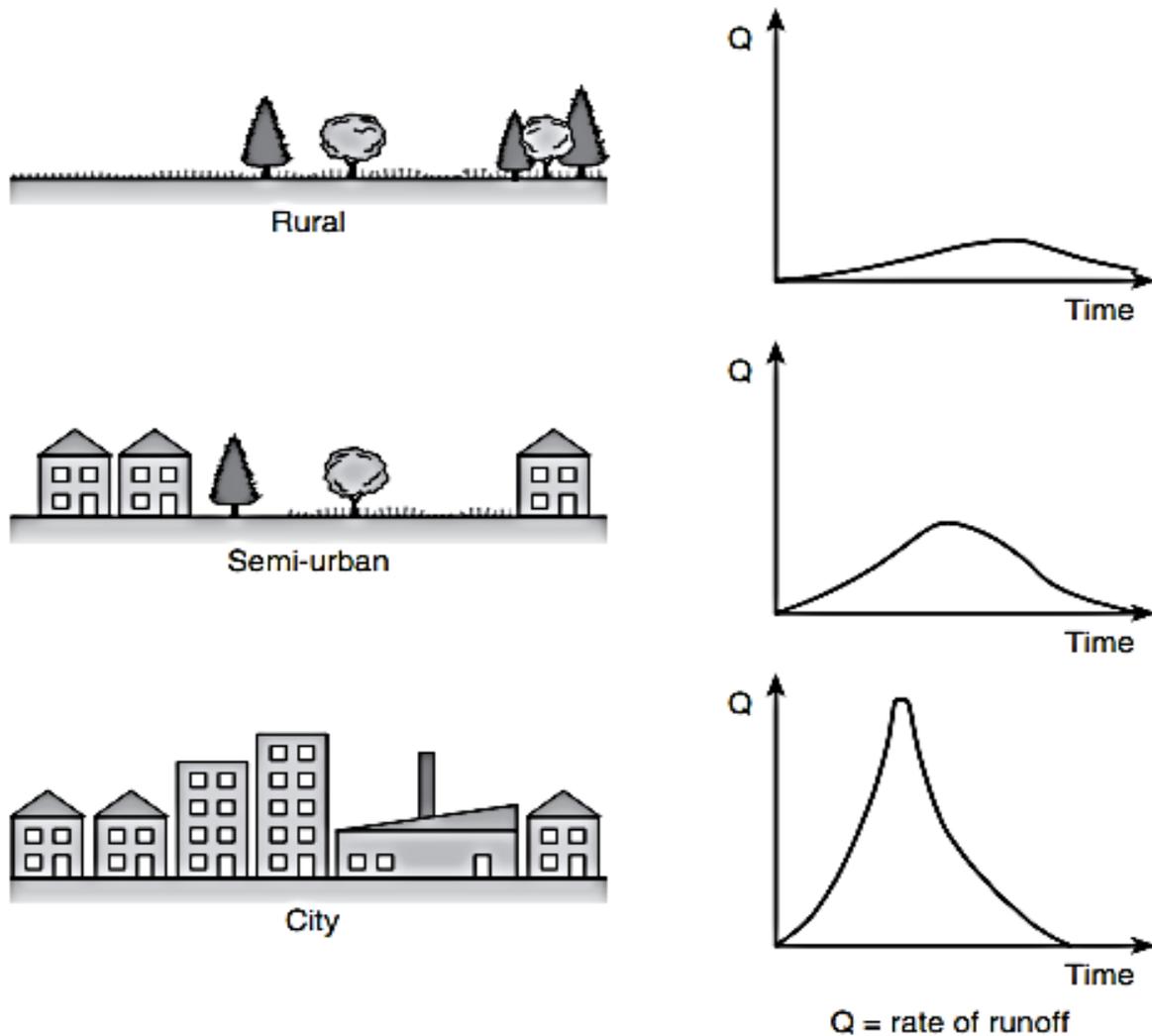


Figura 2. Efecto de la urbanización en el gasto pico del escurrimiento.

Fuente: Butler y Davies (2004).

El hecho de que se propongan acciones en las ciudades para generar CIAU facilita la transformación y el desarrollo de “ciudades sensibles al agua”, por lo que el foco permanecerá en el “cómo”, con ideas de los mejores pensadores y con prácticas responsables en la gestión del agua

urbana, diseño urbano y aplicaciones en los sistemas sociales e institucionales.

Manejo del agua visión-holística

Niemczynowicz (1999) dijo que la gestión del agua urbana se está integrando con las políticas de uso del suelo, y la planificación del paisaje está comenzando a integrarse con el desarrollo urbano, la construcción de edificaciones, la economía, la regulación, la legislación, la educación, los procesos de aceptación y el compromiso social (Mitchell, 2006).

Los sistemas de agua urbanos deben incluir una visión holística que permita que el suministro de agua, el tratamiento de aguas residuales y el drenaje de aguas pluviales se vean como componentes que interactúan dentro de un solo sistema y para ello es oportuno ponderar el impacto del cambio para visualizar el alcance de su efectividad por adelantado (Makropoulos *et al.*, 2008).

Manejo Integral Urbano del Agua (MIUA)

Para lograr los principales objetivos del Manejo Integral Urbano del Agua (MIUA) es importante conocer que los paradigmas existentes sobre los sistemas de agua urbanos (el manejo integral de las aguas pluviales, la infraestructura y el comportamiento de las aguas urbanas) cambian constantemente por los paradigmas emergentes. Algunos de ellos se citan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los paradigmas viejos y emergentes de los sistemas de agua urbanos.

Manejo integral de las aguas urbanas	
Viejo paradigma	Paradigma emergente
Complejidad limitada y uso de soluciones estandarizadas Limitadas tecnologías elaboradas por profesionales en agua urbana definen la infraestructura del agua	La permisión de diversas soluciones. El grupo de creadores de las decisiones es multidisciplinario, lo que permite nuevas estrategias de manejo y tecnología
Integración por accidente. Sobre el abastecimiento del agua, las aguas residuales y las aguas pluviales deben ser manejadas por la misma agencia simplemente por casualidad histórica. De forma física, tres tipos de sistemas funcionan separadamente	Integración física e institucional desde el diseño. Los vínculos deben realizarse entre el abastecimiento del agua, las aguas residuales y las aguas pluviales; por lo tanto, se necesita un manejo con coordinación rigurosa
Colaboración = relaciones públicas. Se enfocan otras agencias y el público en general cuando se requiere de aprobaciones o soluciones preestablecidas	Colaboración = compromiso. Se enlistan oficialmente y se toman en cuenta otras agencias y al público en general para la búsqueda de soluciones efectivas
Las aguas residuales y las aguas pluviales se consideran corrientes residuales que necesitan ser dirigidas fuera del ambiente urbano y transportadas lo más rápido hacia disposición final	Incremento del cambio en la percepción sobre las aguas residuales y las aguas pluviales como recursos que necesitan ser explotados en lugar de subproductos inevitables de la urbanización

Manejo integral de las aguas urbanas	
Viejo paradigma	Paradigma emergente
El manejo de las aguas pluviales no se ejecuta de forma integrada con los demás tipos de aguas urbanas y es considerada como un perjuicio para las zonas urbanas	Se hace un manejo integral y las aguas pluviales tienden a ser un gran potencial; se toma en cuenta la valorización del recurso, que puede ser para abastecimiento de agua, infiltración y retención para recargar los acuíferos, los canales naturales de agua y la vegetación natural
Infraestructura gris. La infraestructura está hecha de concreto, metal o plástico	Infraestructura verde. La infraestructura no solo incluye tubería y plantas de tratamiento, hechas de concreto, metal y plástico, sino que también comprende suelos y vegetación
Mientras más grandes y centralizados sean los sistemas de recolección y plantas de tratamiento es mejor	Lo pequeño y descentralizado es posible, con frecuencia deseado para el sistema de recolección y las plantas de tratamiento

Fuente: modificada de Mitchell (2006), Makropoulos *et al.* (2008), Roy *et al.* (2008).

Se percibe entonces que el concepto de MIUA se relaciona con el de DUSA (Diseño Urbano Sensible al Agua) (Brown & Farrelly, 2009). DUSA reintroduce el factor estético y el valor intrínseco de las vías pluviales para retornarlas dentro del paisaje urbano, contribuyendo al bienestar de la comunidad del lugar; además aumenta la plusvalía de los asentamientos urbanos aledaños y la conservación del valor del suelo. Todo lo anterior puede ayudar a aumentar la aceptación por parte del público para

impulsar su implementación en las ciudades (Roy *et al.*, 2008; Nóblega-Carriquiry, Sauri, & March, 2020).

Mientras más se lleve a cabo el DUSA, se estima que los costos del diseño para el drenaje pluvial bajarán, y las instituciones y el público tenderán a ser más receptivos a la sustentabilidad y al manejo integral de las aguas pluviales. Sería de gran relevancia generar más análisis de costo-beneficio para proveer evidencias convincentes a los tomadores de decisiones en el sitio (Roy *et al.*, 2008).

La viabilidad de tales sistemas que contribuyen al MIUA dependerá del capital, de los costos de funcionamiento del sistema y de los beneficios del sistema de recolección de aguas pluviales. Es el caso de la reducción del consumo de agua con calidad para consumo humano extraída de diversas fuentes (frecuentemente subterráneas) y potabilizadas, incremento de la infiltración local del agua y la independencia del sistema de abastecimiento principal. También la población tendrá beneficios educativos y de prestigio, por lo que será fácil para la gente hacer la conexión entre los recursos naturales y su comportamiento, impulsando un sentimiento de responsabilidad hacia el adecuado uso del agua. En términos de prestigio, los residentes serán parte del pensamiento progresivo, por ello, llevar a cabo estrategias hacia el MIUA en ciudades es un proyecto innovador que beneficia a la sociedad tanto como al ambiente (Villarreal & Dixon, 2005).

Dichos beneficios de implementar un MIUA se han reflejado en países como Holanda, Australia, EUA y Francia, entre otros (Mitchell, 2006).

Las técnicas del DUSA y del desarrollo de bajo impacto (DBI) como se le llama en EUA, y donde están involucrados los SUDS, se diseñan para capturar y retener temporalmente las aguas pluviales, como ocurre con los estanques de detención. También hay unos diseños para la infiltración de aguas, como el pavimento permeable o las áreas de infiltración en camellones, que están contruidos con filtros para eliminar contaminantes, o que en su caso están conectados con tuberías para mandar las aguas pluviales a tratamiento previo a su infiltración al subsuelo (EPA UE, 2000). En estos últimos, su función es que el escurrimiento que va sobre la superficie impermeable se desvía hacia el camellón al mismo tiempo que se va infiltrando entre el suelo. El dispositivo provee un apartado de almacenamiento y mejora la habilidad del suelo para aceptar agua por medio de la generación de un área superficial de contacto (CIRIA, 2015). Al capturar las aguas de tormenta con dichas técnicas se reduce la frecuencia de las inundaciones.

En un tren de tratamiento de aguas pluviales, las técnicas de infiltración se consideran un tratamiento secundario y son parte fundamental del DUSA, dado que filtran contaminantes, eliminando parcialmente los sedimentos, metales pesados y bacterias patógenas para que no lleguen a las aguas subterráneas. Lo anterior puede ser por medio de franjas de infiltración con vegetación, cunetas verdes, balsas de detención, áreas de biorretención, áreas de infiltración en camellones, balsas de infiltración y zanjas de infiltración; dichos procesos de tratamiento implican procesos físicos y bioquímicos (Ronald-Mangangka, 2018).

La eliminación de contaminantes a través de los procesos físicos se consigue mediante la sedimentación, filtración e infiltración de las partículas o de los sólidos en suspensión, y por lo tanto incluye los contaminantes unidos a elementos como el fósforo. Los procesos bioquímicos se producen en relación con determinados contaminantes, como hidrocarburos, que son digeridos o procesados por la vegetación y los microorganismos del suelo. Por lo tanto, para optimizar la eliminación de contaminantes es necesario un tiempo de contacto entre el escurrimiento de las aguas pluviales, la vegetación y la superficie del suelo. Además, la eliminación de los contaminantes solubles en las franjas de infiltración con vegetación depende de la tasa de infiltración, teniendo en cuenta que la eliminación se produce cuando los contaminantes se infiltran en el suelo, donde parte de ellos son absorbidos por las raíces de la vegetación.

Otros factores que influyen en la eliminación de contaminantes de las áreas de infiltración en camellones y cunetas con vegetación son la longitud, pendiente, permeabilidad del suelo y vegetación, altura y densidad de la vegetación, área de captación, tamaño de las partículas, concentración de contaminantes, velocidad de sedimentación, velocidad de escurrimiento, y caudal y tiempo de contacto (Ronald-Mangangka, 2018).

Es importante mencionar que aunque numerosos estudios se han centrado en los procesos físicos de eliminación de contaminantes, en estos procesos de tratamiento se dispone de poca información para explicar los procesos bioquímicos por parte de la vegetación y los microorganismos del suelo que intervienen en la eliminación de

hidrocarburos y contaminantes disueltos. Por lo tanto, deben abordarse los estudios adecuados para comprender mejor estos procesos (Ronald-Mangangka, 2018); las técnicas del DUSA tienen el potencial de mitigar tanto problemas de cantidad como de calidad del agua en las corrientes.

El uso pertinente del DUSA y la ejecución adecuada del DBI se muestran en la Figura 3 con un tren de MIUA general.

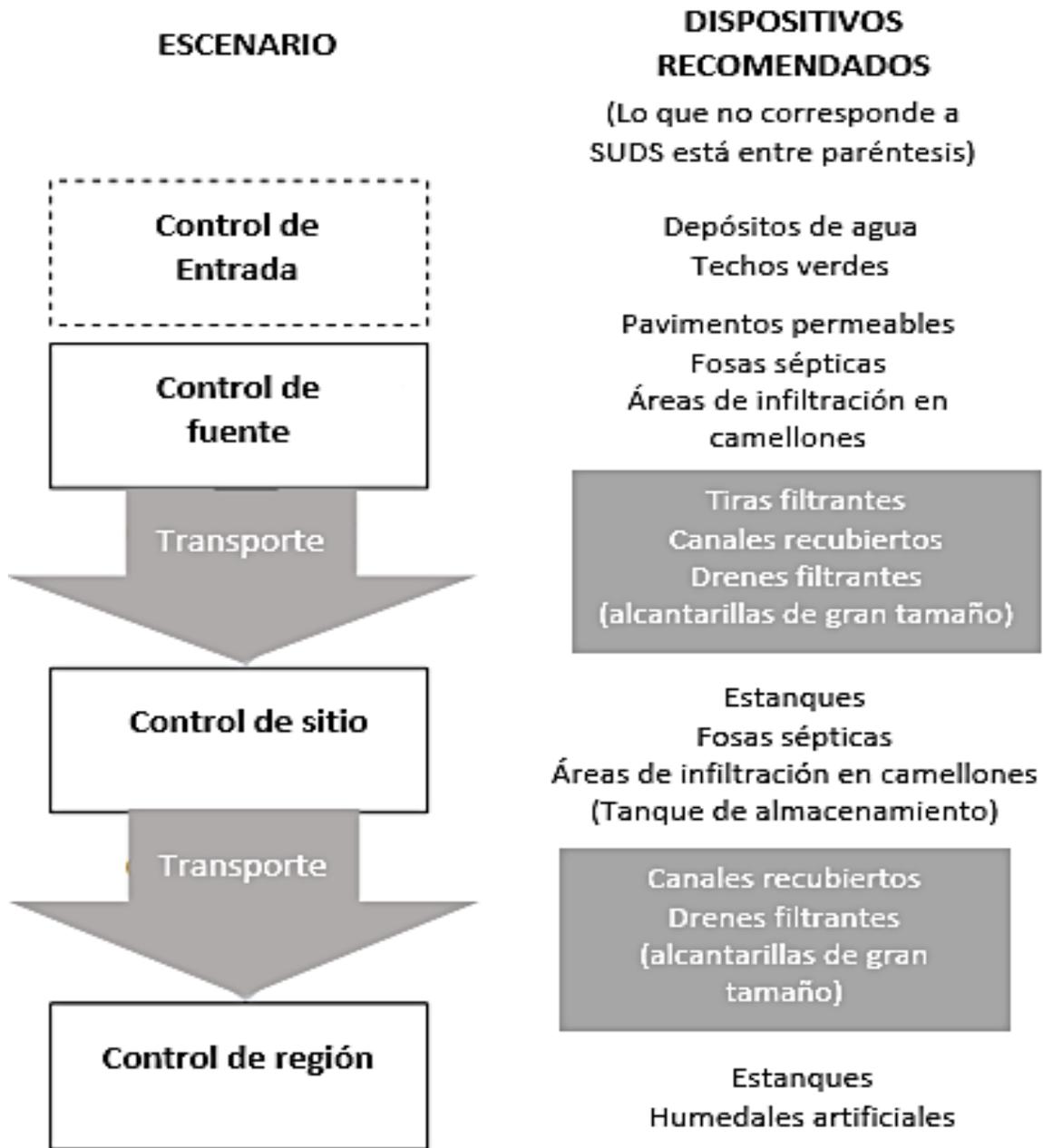


Figura 3. Tren de manejo integral urbano del agua. Fuente: Butler y Davies (2004).

Retos ambientales urbanos del drenaje urbano

El siglo XXI presenta desafíos ambientales para los sistemas de drenaje urbano, como la necesidad de rentabilidad y de mejoras tecnológicas socialmente aceptables. La condición de realizar evaluaciones de impacto sobre estos sistemas e implementar soluciones sustentables es un desafío que no puede verse como una responsabilidad profesional única. Los legisladores, ingenieros, ambientalistas y todos los ciudadanos tienen diferentes posturas que importa ejercer de forma asociada. Los ingenieros requieren comprender no solo los aspectos técnicos, sino también el contexto más amplio, y aquellos que influyen en la política deben comprender los aspectos técnicos (Butler & Davies, 2004; Bell, 2017).

Estos problemas pueden ser los impactos físicos de las corrientes en las superficies y barreras de las zonas urbanas, y los impactos en la calidad del agua, pues los escurrimientos de aguas pluviales arrastran contaminantes (Roy *et al.*, 2008). A pesar de dichos problemas, algunas veces la regulación se introduce a las regiones sin cambios adecuados y específicos a las características del territorio y, por ende, la regulación falla (Brown & Keath, 2008).

Es esencial difundir a través de diversos medios y realizar exposiciones para incrementar la conciencia pública con el propósito de disminuir cualquier escepticismo o resistencia sobre el MIUA. Por ello se recomiendan las siguientes acciones concretas para afrontar los mayores impedimentos hacia el MIUA (Roy *et al.*, 2008):

- a) Establecer conductas de investigación en costos y rendimiento a escala de cuenca.

- b) Crear un modelo de ordenamiento, y promover los documentos guía o manuales.
- c) Establecer un manejo integrado a través de los diferentes niveles de gobierno y el ciclo del agua completo.
- d) Desarrollar talleres específicos para la educación continua de profesionistas.
- e) Usar a las instituciones o colegios como respaldo de base para obtener apoyo de ordenamientos y regulaciones.
- f) Afrontar los obstáculos actuales de los enfoques del mercado para poder proporcionar mecanismos de financiamiento.
- g) Educar y generar compromiso por parte de la comunidad a través de hechos.

A pesar de conocer los retos del desarrollo sustentable en los drenajes urbanos, diversos comentaristas, como profesionistas, académicos y técnicos, entre otros, reconocen que el progreso actual hacia las metas del Manejo Sustentable Urbano del Agua (MSUA) ha sido lento si se tiene en cuenta el desarrollo de nuevas tecnologías y de infraestructura en los últimos 20 años. Esta apreciación puede generalizarse tanto para países de economías emergentes, como para las economías desarrolladas (Brown, Farrelly, & Keath, 2007).

Enfoque sociopolítico, institucional y legal del manejo sustentable urbano del agua

Algunos autores resaltan que un marco legal no es en su totalidad la prioridad, pero que más allá de las discrepancias entre instituciones y formulando un enfoque integrado para la gestión del agua se pueden establecer las bases de una gestión a escala de cuenca (Roy *et al.*, 2008). De hecho, la capacidad institucional avanzada para el manejo sustentable urbano del agua se reconoce como un reforzamiento de diversas soluciones tecnológicas (Wong & Brown, 2009).

Para involucrar dichas partes interesadas incluyendo a políticos y empresarios y poder llevar a cabo un manejo sustentable urbano del agua se ha desarrollado en algunos países el “contrato hidro-social”, que sirve para describir valores predominantes y frecuentemente acuerdos implícitos entre las comunidades, gobiernos y negociantes/ejecutivos acerca de cómo llevar a cabo un adecuado manejo. Este contrato se forma con base en la perspectiva cultural dominante y en los valores hídrico-urbanos históricamente arraigados, expresados a través de acuerdos institucionales y marcos de regulación junto con representaciones físicas de infraestructura para el agua (Brown, Keath, & Wong, 2009; Neto, 2016).

Ciudades resilientes y agua urbana

De acuerdo con Wong y Brown (2009), y Folke (2006), una ciudad en tanto sistema resiliente es interpretado como:

- a) La cantidad de adversidades que un sistema puede absorber y aun así permanecer dentro de un mismo estado.
- b) El grado en el que el sistema es capaz de organizarse por sí mismo (contra la debilidad de organización o de la organización forzada por factores externos).
- c) El grado en el que el sistema puede construir e incrementar la capacidad para aprender y adaptarse.

La resiliencia no se trata solamente de ser persistente o fuerte ante las adversidades, también refleja la forma en que los sistemas crean oportunidades ante las adversidades para renovarse, y perseguir nuevas trayectorias y estilos de vida.

Discusión

Existen diferentes términos en el mundo para el desarrollo tecnológico de drenajes sustentables, aunque en este artículo se emplea el SUDS.

Durante la revisión bibliográfica se observó que hay diversas clasificaciones de los SUDS de acuerdo con su función, tipo de sistema que lleva a cabo o lugar de su instalación. Además, se perciben de una manera integral para un desarrollo urbano sustentable, pues al diseñarlos se consideran aspectos legales, institucionales, políticos, sociales,

técnicos y económicos. Dichos sistemas también impulsan la conservación del ambiente, el uso controlado del suelo, el desarrollo de bajo impacto y la conservación de la salud de la sociedad urbana.

Al mismo tiempo controlan los volúmenes de escurrimiento pluvial; reducen su velocidad y la fuerza destructiva de las aguas superficiales; minimizan los riesgos por inundaciones; conservan la calidad de corrientes aguas abajo, pues remueven contaminantes del agua pluvial; impulsan la recarga de acuíferos con previo tratamiento para mantener los ríos y flujos de corrientes en periodos de secas; conservan el paisaje de los humedales; protegen y mejoran la calidad del agua; proveen oportunidades significativas para la creación de hábitats de humedales; conservan el bienestar de la población y comunidades, influyendo en la armonía del suelo urbanizado, favoreciendo la evapotranspiración y la regulación del clima en territorios urbanos.

Las ventajas mencionadas no empatan con los diseños de los sistemas de drenaje pluvial urbanos actuales, ya que su principal finalidad es transportar los escurrimientos de forma acelerada, lo que limita su contacto con las personas, los asentamientos urbanos e infraestructura. Por lo tanto, se destacan sus siguientes desventajas:

- Incremento de la frecuencia, volumen y duración del escurrimiento superficial.
- Altos picos de descarga y velocidades del flujo.
- Cambios en el régimen de flujo base (tiempo seco).
- Incremento del riesgo de desbordes.
- Ascenso de la temperatura del escurrimiento superficial.
- Pérdida de humedales, con pérdida de hábitats terrestres.

- Hábitats dañados y modificaciones de los ecosistemas asociados con la erosión del lecho y las laderas de los ríos, que genera transporte de sedimentos y contaminantes, aumento del ancho del canal y su inestabilidad, y el deterioro de los hábitats acuáticos y terrestres.
- Introducción de nuevas fuentes y tipos de contaminantes.
- Aumento de la transferencia de contaminantes, algunos de los cuales son potencialmente tóxicos y con una duración de largo plazo, lo que genera cambios en la calidad del agua.

Por lo anterior, hay amplias oportunidades en la ingeniería, legislación, ciencia, sustentabilidad, y diversos campos de estudio y de ejecución de infraestructura urbana para alcanzar la restauración hidrológica, la cual puede desarrollarse al implementar drenajes naturales para restaurar corrientes urbanas e impulsar la sostenibilidad de los ecosistemas.

Para lograr el DUSA o el MIUA es necesario superar retos durante las próximas décadas sobre el manejo del agua urbana, como organizar la cooperación intersectorial entre varios actores para introducir en el diseño de las ciudades innovaciones tecnológicas para el agua; sistemas de manejo; acuerdos institucionales para desarrollar la capacidad de cumplimiento de los objetivos, y desarrollar sensibilidad hacia el manejo del agua, pues se considera como un bloque fundamental de construcción hacia ciudades sustentables y resilientes.

Lo siguiente puede hacer la diferencia de una ciudad “vulnerable” a una ciudad “resiliente” y sensible al agua: capacitar y transmitir a la comunidad estrategias para un manejo sensible del agua; estrechar los vínculos entre académicos y políticos para implementar proyectos para el

DUSA y darles continuidad para evitar que muchos de ellos solo sean proyectos pilotos o que solo sean tratamientos limitados donde solo se implementa uno de los componentes del tren del SUDS; impulsar programas para facilitar el acceso a capital económico para implementar en las ciudades el desarrollo de SUDS y construir dichos sistemas con su tren de tratamiento completo; esto incluye el tratamiento primario de aguas pluviales para eliminar residuos de gran tamaño; el tratamiento secundario para eliminar sedimentos, metales pesados y bacterias patógenas; y el tratamiento terciario para eliminar sedimentos finos, metales y bacterias patógenos que hayan resistido el anterior tratamiento.

Conclusiones

El escurrimiento superficial de aguas pluviales se puede reducir mediante la recolección para posteriormente contribuir al abastecimiento de agua potable; la instalación de soluciones sin tuberías para el drenaje urbano como SUDS, reduce el estrés hídrico en el área.

La filosofía del diseño del drenaje urbano requiere enfoque para la construcción de los SUDS, considerando que la aplicación de estos sistemas no corresponde a obras alternativas, sino que favorece su integración y se complementa con algunos componentes menores. Esta estrategia de diseño dirige el agua pluvial a áreas verdes, franjas de pasto y/o fosas cubiertas de vegetación, por nombrar algunos. Con lo anterior se disminuye la velocidad del escurrimiento y volúmenes, se amortiguan los flujos máximos y se impulsa la infiltración de agua pluvial al subsuelo.

Asimismo, en el caso de las aguas pluviales, la gente verá su desvío eficiente como parte del “progreso”, si se considera la perspectiva de que en países de bajo desarrollo o de desarrollo emergente, los incrementos de pluviosidad generalmente se asocian con afectaciones significativas a la vida cotidiana, con bajas probabilidades de resiliencia; mientras que en países de economías desarrolladas, las afectaciones por pluviosidad tienden a ser menores y se cuenta con mayor resiliencia.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico para realizar el proyecto del que deriva este artículo. A la Universidad de Medellín, al grupo de investigación GIS y a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), que brindaron el apoyo para la realización de este artículo.

Referencias

- Bell, S. (2017). *Urban water sustainability: Constructing infrastructure for cities and nature* Earthscan studies in water resource management. New York, USA: Routledge.
- Brears, R. C. (2016). *Urban water security*. Oxford, UK: John Wiley & Sons.
- Brown, R. R., & Farrelly, M. A. (2009). Challenges ahead: Social and institutional factors influencing sustainable urban stormwater management in Australia. *Water Science & Technology—WST*, 59(4), 653-660. DOI: 10.2166/wst.2009.022

- Brown, R. R., & Keath, N. (2008). Drawing on social theory for transitioning to sustainable urban water management: Turning the institutional super-tanker. *Australasian Journal of Water Resources*, 12(2), 73-83. DOI: 10.1080/13241583.2008.11465336
- Brown, R. R., Farrelly, M. A., & Keath, N. (2007). Perceptions of institutional drivers and barriers to sustainable urban water management in Australia. Melbourne y Perth, Australia: National Urban Water Governance Program, Monash University. Recuperado de <http://www.monash.edu.au/fawb/publications/summary-report-drivers-barriers-suvm.pdf>
- Brown, R. R., Keath, N., & Wong, T. H. F. (2009). Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science & Technology—WST*, 59(5), 847-855. DOI: 10.2166/wst.2009.029
- Butler, D., & Davies, J. W. (2004). *Urban drainage* (2ª ed.). Londres, UK; New York, USA: Spon Press.
- Castro-Fresno, D., Rodríguez-Bayón, J., Rodríguez-Hernández, J., & Ballester-Muñoz, F. (2005). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). *Interciencia*, 30(5), 255-260. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000500004
- CIRIA. (noviembre, 2015). CIRIA 2022. Recuperado de https://www.ciria.org/Memberships/The_SuDs_Manual_C753_Chapters.aspx

- Elliot, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(10.1016/j.envsoft.2005.12.005), 394-405. DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.12.005
- EPA UE. (2000). Low impact development. A literature review. Washington DC, USA: Office of Water, EPA. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1001B6V.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000%20Thru%202005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFiel>
- Faram, M. G. (2000). Removal of sediments and oils from urban run-off using the downstream defender. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/237116544_Removal_of_Sediments_and_Oils_from_Urban_Run-off_Using_the_Downstream_Defender
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social ecological systems analysis. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002
- Gomes-Miguez, M., Moura-Rezende, O., & Pires-Veról, A. (2015). City growth and urban drainage alternatives: Sustainability challenge. *Journal of Urban Planning and Development*, 04014026-1-04014026-10. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000219

- Graham, A. (2016). Sustainable drainage systems: Delivering multiple benefits for people and wildlife. *Sustainable Surface Water Management: A Handbook for SuDS*, 91-104. DOI: 10.1002/9781118897690.ch7
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Rotterdam, The Netherlands; Tokyo, Tsukuba, Japan: Springer Open. DOI: 10.1007/978-3-319-56091-5
- Leitmann, J. (1999). *Sustaining cities: Environmental planning and management in urban design*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Makropoulos, C. K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., & Butler, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1448–1460. DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.04.010
- Mguni, P., Herslund, L., & Jensen, M. (2016). Sustainable urban drainage systems: Examining the potential for green infrastructure-based stormwater management for Sub-Saharan cities. *Natural Hazards*, 82, 241-257. DOI: 10.1007/s11069-016-2309-x
- Mitchell, V. G. (2006). Applying integrated urban water management concepts: A review of Australian experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. DOI: 10.1007/s00267-004-0252-1
- Momparler, S. P., & Andrés-Doménech, I. (mayo, 2015). Ovacen. Recuperado de <http://ovacen.com/wp-content/uploads/2015/05/gestion-del-agua-en-el-planeamiento.pdf>

- Natsis, K., Makropoulos, C., Liu, S., Butler, D., & Memon, F. (2006). A fuzzy logic multicriteria assesment in urban water management decision support. *Environmental Modelling & Software*, 4, 2725-2732. DOI: 10.1016/j.proeng.2018.01.105
- Neto, S. (2016). Water governance in an urban age. *Utilities Policy*, 43, 32-41. DOI: 10.1016/j.jup.2016.05.004
- Neupane, B. (2018). Effectiveness of low impact development practices in reducing urban stormwater runoff under land use and climate change scenarios. Recuperado de https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2921
- Niemczynowicz, J. (1999). Urban hydrology and water management—present and future challenges. *Urban Water*, 1, 1-14. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(99\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(99)00009-6)
- Nóblega-Carriquiry, A., Sauri, D., & March, H. (2020). Community involvement in the implementation of sustainable urban drainage systems (SUDSs): The case of Bon Pastor, Barcelona. *Sustainability* 12(2), 510. DOI: 10.3390/su12020510
- Peña-Guzmán, C. A., Melgarejo, J., & Prats, D. (2016). El ciclo urbano del agua en Bogotá, Colombia: estado actual y desafíos para la sostenibilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 57-71.
- Potter, K., & Vilcan, T. (2020). Managing urban flood resilience through the English planning system: Insights from the 'SuDS-face'. *The Royal Society*, 1-18. DOI: 10.1098/rsta.2019.0206

- Rodríguez, H. J. (2008). Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Rodríguez, J. B., Rodríguez, J. H., & Gómez-Ullate, E. (2007). Biblioteca digital del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Recuperado de http://www.ciccp.es/biblio_digital/urbanismo_i/congreso/pdf/040505.pdf
- Ronald-Mangangka, I. (2018). Understanding water sensitive urban design (WSUD) concept. *Jurnal Sipil Statik*, 6(1), 21-34.
- Roy, H. A., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., Shuster, W. D., Thurston, H. W., & Brown, R. R. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States. *Environmental Management*, 42(2), 344-359. DOI: 10.1007/s00267-008-9119-1
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016
- Villarreal, L. E., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174-1184. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.10.018

- Wong, T. H., & Brown, R. R. (2009). The water sensitive city: Principles for practice. *Water Science & Technology—WST*, 60(3), 673-682. DOI: 10.2166/wst.2009.436
- Wong, T. H., & Eadie, M. L. (2000). Water sensitive urban design. A paradigm shift in urban design. Melbourne Vic Australia: 10th World Water Congress.