

Uso de tecnologías de bajo impacto como alternativa para la restauración del ciclo hidrológico en zonas urbanas: Campus universitario de la UAEH como caso de estudio

Use of low impact technologies as an alternative for the restoration of the hydrological cycle in urban zones: University campus of the UAEH, as a case study

LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA-MENDIOLA

FRANCISCO OMAR LAGARDA-GARCÍA

CARLOS ALFREDO BIGURRA-ALZATI

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Recibido: 2 de abril de 2018. Aceptado: 26 de octubre de 2018.

RESUMEN

El campus universitario presenta problemas hídricos: encharcamientos en época de lluvias, desabasto y cortes de agua. Este trabajo evaluó la posibilidad de restaurar el ciclo hidrológico urbano mediante tecnologías LID en una zona con baja precipitación. Se establecieron las siguientes variables hidrológicas para el diseño: precipitación anual para un año muy seco (181.1 mm), precipitación promedio de 15.09 mm, con máxima de 53 mm y mínima de 0 mm. Se calculó el volumen de agua de lluvia recolectable en azoteas, el coeficiente de escurrimiento (concreto, $C = 0.9$) y el consumo promedio diario en sanitarios. Se dimensionó el sistema de almacenamiento y el número de días en que se satisface la demanda como agua no potable. Se calculó el volumen de escurrimiento medio (V_m) en estacionamientos y vialidades con superficies asfálticas ($C = 0.8$) y andadores de concreto ($C = 0.9$) y se comparó con el V_m si se sustituyeran con pavimento permeable ($C = 0.7$). Además, se determinó la capacidad de infiltración en áreas verdes. A través de un modelo conceptual, se explica que existe el potencial para restaurar el ciclo hidrológico urbano combinando tecnologías LID: la demanda anual

de agua en sanitarios se satisface en un 10.68%; el volumen de escurrimiento medio se reduce en estacionamientos en un 97.9%, 12.5% en el circuito vial, así como un 22.2% en andadores.

Palabras clave: tecnologías LID, recolección de lluvia, pavimento permeable

ABSTRACT

The university campus presents water problems: flooding during the rainy season, shortages and water cuts. This work evaluated the possibility of restoring the urban hydrological cycle through LID technologies in an area with low precipitation. The following hydrological variables were established for the design: annual rainfall for an arid year (181.1 mm), the average rainfall of 15.09 mm, the maximum of 53 mm and the minimum of 0 mm. The volume of rainwater harvestable on roofs was calculated; runoff coefficient (concrete, $C = 0.9$); average daily consumption in toilets. The storage system was dimensioned and the number of days in which the demand is satisfied as non-potable water. The volume of average runoff (V_m) in parking lots and roadways with asphalt surfaces ($C = 0.8$) and concrete walkways (C

= 0.9) was calculated and compared with the V_m if they were replaced with permeable pavement ($C = 0.7$). Also, infiltration capacity in green areas was determined. Through a conceptual model, it is explained that there is the potential to restore the urban hydrological cycle by combining LID: the annual demand for water in sanitation can be satisfied by 10.68%; the volume of average runoff is reduced in parking lots by 97.9%, 12.5% in the road circuit, as well as 22.2% in walkways.

Key words: LID techniques, rainwater harvest, permeable pavement

INTRODUCCIÓN

Cuando las ciudades carecen de sistemas eficientes para la recolección del agua de lluvia, esta se mezcla con el drenaje urbano municipal, el cual transporta el agua residual proveniente de casas, comercios y otro tipo de construcciones predominantes en una ciudad (Angrill *et al.*, 2017). Las ciudades de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma no son ajenas a este problema hídrico: muchas zonas dispersas en las partes bajas de ambas ciudades presentan encharcamientos durante la época de lluvias, lo que ocasiona principalmente congestionamientos viales, daño al pavimento, así como un desaprovechamiento de áreas verdes y superficies que podrían volver a favorecer su interceptación e infiltración. Desde la década de 1990, las ciudades de Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma se han enfrentado al problema de desabasto en el servicio público municipal (Amaya-Ventura, 2011). Como consecuencia, la población sufre los problemas de desabasto, cortes de agua y servicio de tandeo de manera continua.

Las tecnologías de bajo impacto son una opción ecológica para ayudar a la restauración natural del ciclo hidrológico en sitios urbanos (Eckart *et al.*, 2017; Kong *et al.*, 2017; Ni-Bin *et al.*, 2018). Su implementación puede contribuir a la mitigación de problemas de inundación (Martin-Mikle *et al.*, 2015; Ahiablame y Shakya, 2017; Hu *et al.*, 2017). Además, funcionan como sistemas de tratamiento que contribuyen en la depuración del agua

de lluvia, así como de la escorrentía superficial (Ortiz-Hernández *et al.*, 2016; Zhan y Chui, 2016; Zhang *et al.*, 2018). Entre las tecnologías más comúnmente estudiadas se encuentran: pavimentos permeables (Winston *et al.*, 2016; Her *et al.*, 2017; Kamali *et al.*, 2017; Law *et al.*, 2017) y recolección de agua de lluvia (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2015).

En este trabajo se expone la situación de un campus de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), que presenta el mismo tipo de problemáticas que la población en general en ambas ciudades: 1) volúmenes insuficientes de agua potable para satisfacer la demanda de 6,148 usuarios en sanitarios de los distintos edificios y 2) inundación en las partes bajas durante la época de lluvias. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo consiste en realizar una evaluación preliminar de la posibilidad de restaurar el ciclo hidrológico urbano mediante la implementación de tecnologías combinadas de bajo impacto en un campus universitario, minimizando los problemas de desabasto e inundaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

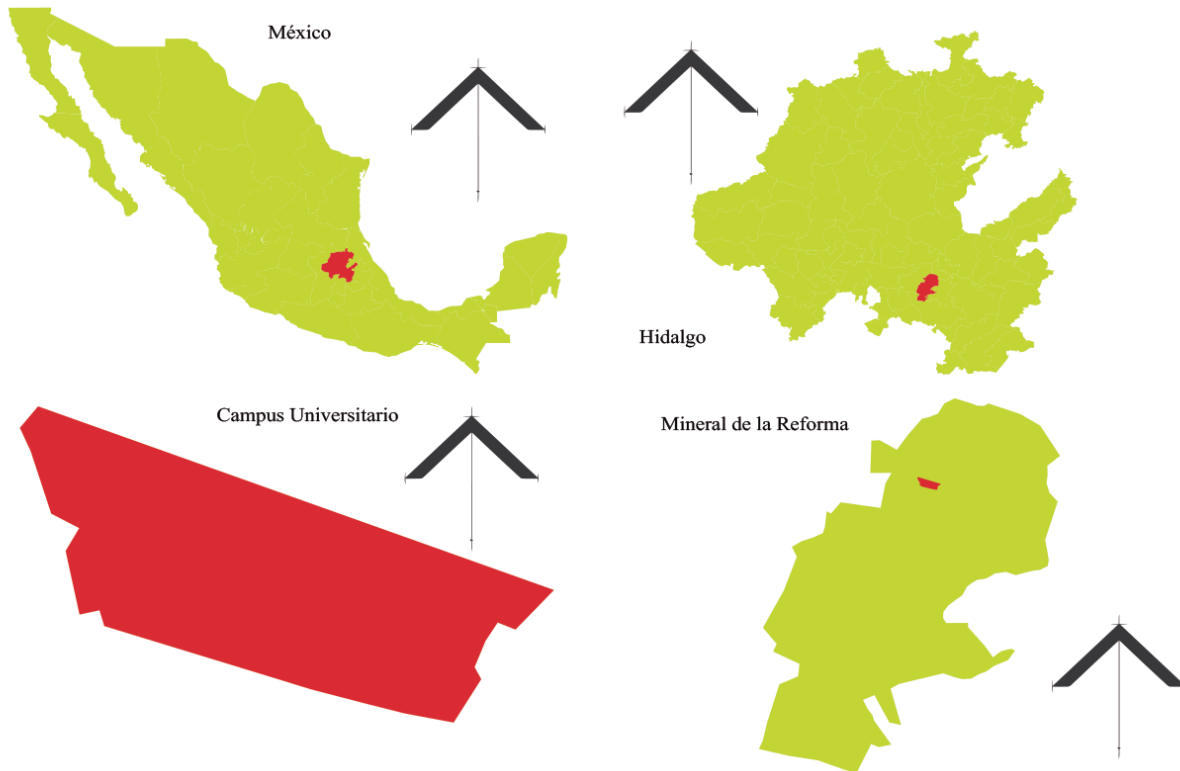
1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El campus universitario se localiza en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo, entre los paralelos 20°5'38.81" latitud norte, y los meridianos 98°42'40.95" longitud oeste, a una altitud promedio de 2,400 msnm (figura 1). Su clima es semiárido-templado, con periodo de lluvias comprendido entre los meses de mayo y octubre. Su temperatura promedio anual es de 14°C y su precipitación anual oscila entre los 400 y 800 mm (Servicio Meteorológico Nacional, SMN, 2017).

2. CENSO DE USO DE SUELO E INFRAESTRUCTURA EXISTENTE

Para realizar la selección de las tecnologías LID que podrían proponerse como alternativa para la captación del agua de lluvia en un campus de la UAEH, se realizaron recorridos para establecer un censo de la infraestructura hidráulica existente, así como sus condiciones físicas. Se calcularon

FIGURA 1. Localización geográfica del área de estudio.

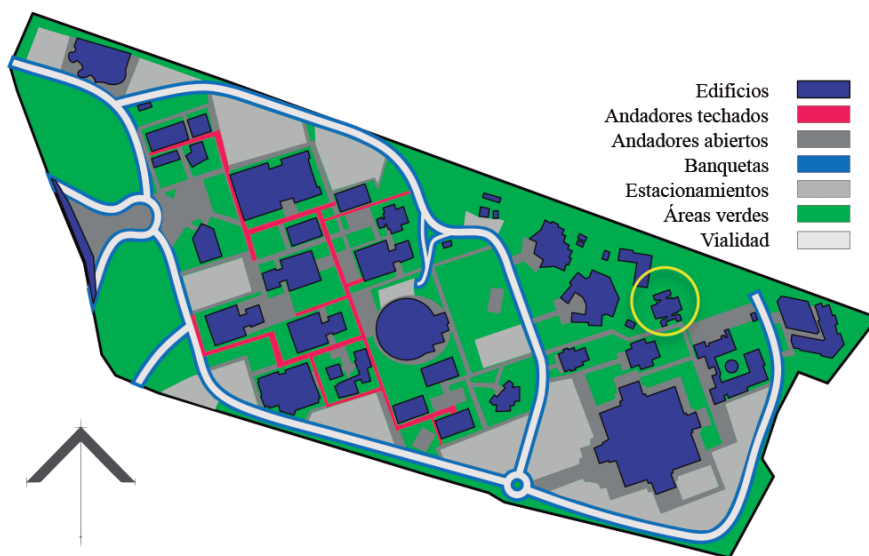


Fuente: Modificado de Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2017.

los distintos usos de suelo, las áreas cubiertas con la infraestructura instalada (edificios, estacionamientos, vialidades, andadores, áreas verdes),

y la infraestructura hidráulica más importante (canales, bajadas de agua de lluvia en edificios y alcantarillas) (figura 2).

FIGURA 2. Principales usos de suelo e infraestructura existente.
En círculo amarillo: edificio seleccionado para el modelo conceptual.



3. ESTIMACIÓN DE LOS VOLÚMENES DE AGUA DE LLUVIA INTERCEPTADOS

Para obtener los volúmenes de agua de lluvia que podrían ser interceptados en azoteas de los edificios, estacionamientos, andadores y vialidades (con sustitución de asfalto y concreto por pavimento permeable), se utilizaron los datos hidrológicos registrados en un estudio previo realizado en este campus (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2017a). Los criterios generales de diseño fueron los siguientes: a) se seleccionaron los datos de precipitación del año más seco registrado en un periodo histórico de 33 años (1980-2013); la precipitación anual fue de 181.1 mm, la precipitación promedio anual fue de 15.09 mm, la máxima anual fue de 53 mm y la mínima anual de 0 mm.

COLECTA DE AGUA DE LLUVIA EN AZOTEAS

Existen 31 edificios con superficies de azoteas que varían desde 34,5 m² hasta 5,125.12 m². Se estableció como superficie disponible para captación el 80% del área de cada una de las azoteas, debido a pérdidas por evaporación o porosidad de la superficie. En 29 edificios, sus superficies son principalmente de concreto, aunque existe un edificio con superficie de policarbonato y uno más con superficie de cristal. Sobre la base de los criterios del *Soil Conservation Service* (SCS, 1972), los coeficientes de escurrimiento elegidos para este análisis fueron: 0.9 (superficies de concreto) y 0.1 (superficies de policarbonato y cristal). También se consideró que la primera lluvia no debe ser recolectada, para impedir la entrada de sólidos en un sistema de almacenamiento. Por lo tanto, de acuerdo con Su *et al.*, (2009), se retiraron los primeros 0.33 mm de lámina de lluvia (*first flush*, en inglés). La lámina de lluvia considerada fue la anual (181.1 mm). El cálculo para estimar el volumen de agua de lluvia recolectable en los edificios (m³/a) se realizó según la ecuación 1:

$$V_{ac} = (Sa * C) * (P_{panual} - F_f) \quad \text{Ec. 1)}$$

donde:

V_{ac} = volumen de agua de lluvia recolectable (m³/a)

Sa = superficie de azotea (m²)

C = coeficiente de escurrimiento (adimensional)

P_{panual} = precipitación anual (m/a)

F_f = *first flush* (m)

Una vez determinado el volumen recolectable de agua de lluvia, se calculó el tamaño del sistema de almacenamiento. Se propuso un escenario donde un promedio de 100 usuarios al día consumen 0.081 m³/d/persona de agua en los sanitarios (uno para hombres y uno para mujeres en cada edificio) durante todo el año (cinco inodoros con 4 L/descarga —cinco veces/d—, dos mingitorios con 3.7 L/descarga —dos veces/d—, cinco lavamanos con 1.5 L/minuto —siete veces/d). Debido a que en sanitarios no es necesario utilizar agua potable, solo se propone un filtro para la retención de sedimento y otros sólidos finos. Para calcular el volumen de agua de lluvia recolectable que puede aprovecharse en sanitarios, se utilizó la siguiente ecuación 2:

$$V_{acap} = V_{ac} / (0.081 * 100) \quad \text{(Ec. 2)}$$

donde:

V_{acap} = volumen de agua disponible para su uso en sanitarios (m³/año)

Se cuantificó el tamaño necesario del sistema de almacenamiento, siguiendo las recomendaciones de la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2004). Este procedimiento recomienda estimar la oferta del agua, por lo que el valor de precipitación utilizada para su diseño fue la máxima mensual recomendada para el año analizado en esta propuesta, de 53 mm (ecuación 3):

$$A_{oferta} = P_{pm} * C * Sa / 1000 \quad \text{(Ec. 3)}$$

donde:

A_{oferta} = Oferta del agua (m³)

P_{pm} = Precipitación máxima en el año (m)

INTERCEPTACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN ESTACIONAMIENTOS, ANDADORES ABIERTOS Y VIALIDADES

En la figura 2 se muestran nueve estacionamientos distribuidos a lo largo del campus, recubiertos con pavimento asfáltico. Sus superficies varían desde 1,557.47 m² hasta 12,838.36 m². Existe un circuito vial perimetral con superficie asfáltica, con un área de 22,552.31 m². Además, existe una red de andadores descubiertos de concreto, con un área de 4,573.92 m². Por medio de la ecuación 4 se cuantificó el volumen de escurrimiento medio sobre su superficie asfáltica (C= 0.8) y de concreto (C= 0.9), y se comparó con el volumen de escurrimiento medio obtenido, sustituyendo su superficie con concreto permeable (C= 0.7).

$$V_m = A * P_{\text{anual}} * C \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

V_m = Volumen de escurrimiento medio (m³/a)

A = superficie pavimentada (m²)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La restauración del ciclo hidrológico en zonas urbanas requiere la atención y el interés de las autoridades locales y estatales para invertir en la rehabilitación de obras hidráulicas, así como en la construcción de tecnologías de bajo impacto que contribuyan a restablecer la recarga natural de acuíferos y a una gestión más adecuada del recurso hídrico. En este trabajo se analiza preliminarmente el potencial de recuperar volúmenes de agua de lluvia y de escorrentía superficial en un campus universitario, con el fin de contrarrestar un problema de desabasto e inundaciones presentes a escala local. Se espera que estos resultados permitan continuar con una etapa posterior del modelo hidráulico, para realizar la propuesta de construcción de sistemas LID combinados.

1. USO EN SANITARIOS DEL AGUA DE LLUVIA COLECTADA

La precipitación anual bajo condiciones muy secas en el área de estudio (181.1 mm/a) permitiría un ahorro de agua potable equivalente a 5,257.72 m³/año, que actualmente se destina para fines no potables. Del 100% de este volumen de agua recolectable en azoteas podría satisfacerse un 10.68% de las necesidades anuales en los sanitarios (con agua no potable). Aunque las superficies de azotea varían entre un edificio y otro, los consumos aumentan en periodos escolares y se reducen en gran medida en periodo vacacional. Si se instalaran sistemas para almacenar y distribuir el agua de lluvia colectada hacia los sanitarios, se requeriría construir sistemas de almacenamiento con capacidad máxima de 46.13 m³ (para una superficie de azotea equivalente a 5,125 m²) y una mínima de 0.3 m³ (superficie de azotea de 34.5 m²). Este tipo de medidas se considera como opciones adecuadas para mitigar el desabasto del servicio público y controlar problemas de inundaciones, incluso bajo condiciones de precipitación superiores a 20 mm (Palla *et al.*, 2017). En este estudio, a pesar de que se consideró para el análisis un año seco, se contó con una precipitación máxima de 53 mm/d, que permitió obtener volúmenes aprovechables.

2. INFILTRACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL A TRAVÉS DE PAVIMENTO PERMEABLE

Se analizó el potencial de interceptación de la escorrentía superficial bajo condiciones de precipitación previamente descritos en el apartado de metodología. En un estudio previo (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2017b), se diseñó un pavimento permeable con capacidad de infiltración de 118.49 L/min/m². La propuesta en este trabajo consiste en sustituir el pavimento asfáltico en estacionamientos y vialidades, así como el concreto en andadores, con pavimento permeable. En la figura 3 se observa la comparación entre el vo-

lumen que escurre sobre cada tipo de superficie (en estacionamientos —a—, vialidades —b— y andadores —c).

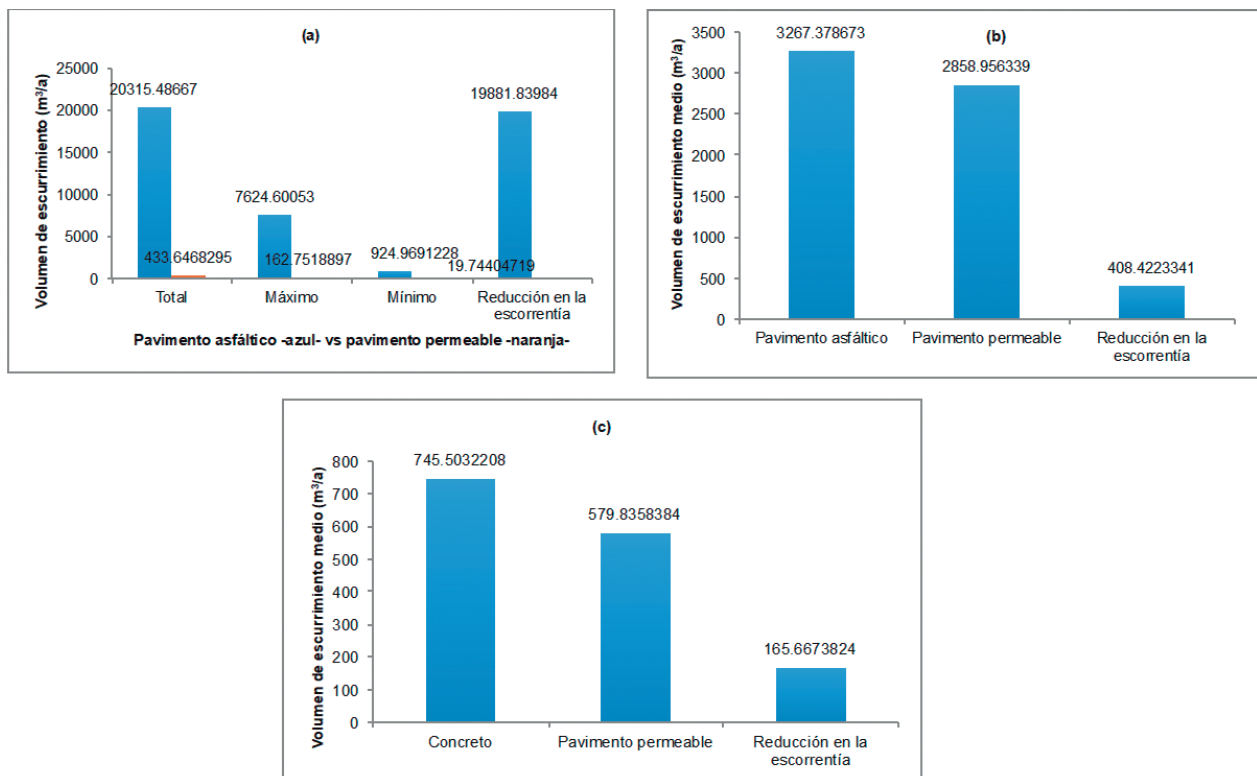
En la figura 3a se observa una considerable disminución de la escorrentía superficial si se sustituyera un pavimento permeable en estacionamientos. Del volumen total escurrido en el pavimento asfáltico (20,315.5 m³/a), la disminución del volumen representa hasta un 97.9% (19,881.8 m³/a), por lo que puede proponerse como una posibilidad de contribuir a una reducción en el problema de encharcamientos y a un aumento en la recarga del acuífero local. Se ha demostrado en otras investigaciones que este tipo de material tiene capacidad para remover contaminantes, lo que significa una buena oportunidad para favorecer la infiltración a través de estos (Zhang *et al.*, 2018). En el caso del circuito vial, el volumen de escurrimiento medio (figura 3b) tiene una capacidad de reducción de la escorrentía superficial menor, aunque de igual forma que en los estacionamientos, y representa un potencial de reducción de hasta 408.4 m³/a (12.5%). Si, además de estos dos tipos de superfi-

cies, se consideran también los andadores (figura 3c), la sustitución de concreto con pavimento permeable representa la posibilidad de aumentar adicionalmente la infiltración de la escorrentía superficial en un 22.2% (165.6 m³/a), y canalizar los volúmenes de excedencia hacia áreas verdes contiguas. Cabe señalar que la reducción de estos volúmenes puede ser eficiente siempre y cuando se complemente la pavimentación con concreto permeable con obras complementarias que recolectarían el volumen que no se alcanza a infiltrar y lo conduzcan hacia áreas verdes donde se infiltre o hacia depósitos para su almacenamiento y recuperación posteriores.

3. MODELO CONCEPTUAL DEL CICLO HIDROLÓGICO URBANO COMBINANDO LID

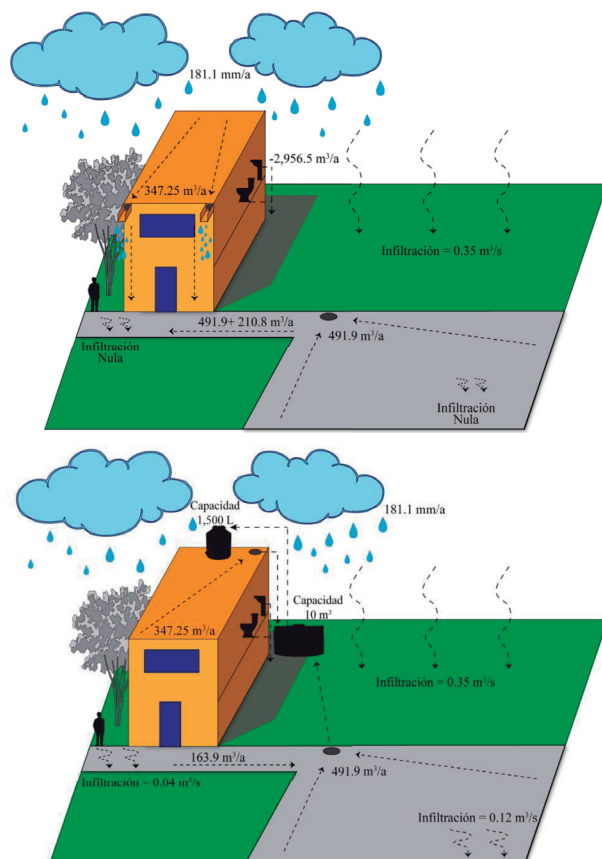
En este trabajo se presenta un modelo conceptual sobre el uso de tecnologías LID en forma combinada que puede ayudar a restaurar el ciclo hidrológico urbano. Para este modelo conceptual

FIGURA 3. Volúmenes de escurrimiento medio (m³/a).



se eligió un edificio del campus, señalado en la figura 2. Este edificio cuenta con una superficie de azotea de 823.59 m², un andador frontal con superficie promedio de 400 m², área de estacionamiento de 1,200 m² y a un costado un área verde con superficie de 3,500 m². Las condiciones de diseño utilizadas son las mismas analizadas previamente: coeficiente de escurrimiento igual a 0.9 (azotea de concreto), 0.7 (pavimento permeable en andadores y estacionamiento) y 0.37 en área verde; la precipitación anual de 181.1 mm, así como el número de usuarios en sanitarios (100 usuarios/día). En la figura 4 se muestra el ciclo hidrológico integrando tecnologías LID para contribuir a su restauración.

FIGURA 4. Modelo conceptual del ciclo hidrológico urbano: a) sin LID y b) con LID.



El volumen total anual de lluvia interceptado en la azotea es equivalente a 347.25 m³/a. Este escurre actualmente sobre el andador y se dirige hacia la

zona de inundación del campus o hacia el drenaje. En el área del estacionamiento, aproximadamente 491.9 m³/a se dirigen a través de canales también hacia la zona de inundación, mientras que el único volumen que se infiltra es aproximadamente de 0.35 m³/s en el área verde contigua.

Si se adapta este sitio con tecnologías LID, se recolectarían aproximadamente 347.25 m³/a, que se pueden almacenar en una cisterna de 10 m³ (suficiente para recibir el volumen equivalente a una semana de precipitaciones continuas). Este volumen estaría disponible para atender la demanda durante solo 43 días al año (11.8%) empleando un tinaco con capacidad máxima de 1,500L (o dos tinacos de 750 L). Además, se lograría reducir un pequeño volumen del consumo de agua potable (de 2,956.5 a 2,609.25 m³/a) sustituyéndolo con agua que requiere de escaso tratamiento para fines no potables. Con respecto al volumen escurrido sobre superficies impermeables (andador y estacionamiento), si se modifica la pendiente del andador y se encausa su volumen escurrido (163.9 m³/a) junto con el volumen escurrido sobre el estacionamiento (491.9 m³/a) por medio de tuberías hacia el área verde: a) se aumentaría el volumen de infiltración en el área verde, mientras que la permeabilidad nula que tiene el pavimento actual aumentaría hasta 0.04 m³/s en el andador y 0.12 m³/s en el estacionamiento.

Con esto, se aprecia que no solo se lograría reducir el volumen de escurrimiento superficial que fluye hacia la zona susceptible de inundación en la parte de menor elevación topográfica del campus, sino también se aumenta el volumen infiltrado hacia el subsuelo en forma local, además de sustituir un pequeño volumen del consumo necesario de agua potable. Este tipo de medidas integrales facilita adaptar la infraestructura existente como sistemas urbanos de drenaje, los cuales han demostrado ser muy eficientes cuando se emplean en forma combinada (Li *et al.*, 2017), y contribuyen en la restauración del ciclo hidrológico urbano.

CONCLUSIONES

El empleo de tecnologías de bajo impacto (LID) representa un potencial poco explotado en México para ayudar en la restauración del ciclo hidrológico urbano. Aunque las superficies disponibles en el campus universitario para implementar este tipo de tecnologías no son necesariamente las óptimas para interceptar grandes volúmenes, distintos estudios recomiendan la combinación de varias LID para aumentar el potencial de restauración del ciclo hidrológico, como se aprecia en el modelo conceptual propuesto. Estas medidas también ayudan a mitigar dificultades en el abasto a la población académica y a aumentar la infiltración hacia el subsuelo en zonas impermeabilizadas con la urbanización, con lo que ayudan a atenuar problemas de inundación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahiablame, L. y R. Shakya (2016), "Modeling Flood Reduction Effects of Low Impact Development at a Watershed Scale", *Journal of Environmental Management*, 171, pp. 81-91. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.036>.
- Amaya-Ventura, M. L. (2011), "Aspectos institucionales de la gestión del agua en Pachuca, Hidalgo", *Revista Mexicana de Sociología*, 73(3), pp. 509-537.
- Angrill, S.; Petit-Boix, A.; Morales-Pinzón, T.; Josa, A.; Rieradevall, J. y X. Gabarrell (2017), "Urban Rainwater Runoff Quantity and Quality-A Potential Endogenous Resource in Cities?", *Journal of Environmental Management*, 189, pp. 14-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.027>
- Campos-Aranda, D. F. (2010), "Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XI (2), pp. 179-188.
- Eckart, K.; McPhee, Z. y T. Bolisetti (2017), "Performance and Implementation of Low Impact Development-A Review", *Science of the Total Environment*, 607-608, pp. 413-432. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>.
- Her, Y.; Jeong, J.; Arnold, J.; Gosselink, L.; Glick, R. y F. Jaber (2017), "A New Framework for modeling Decentralized Low Impact Developments using Soil and Water Assessment Tool", *Environmental Modelling & Software*, 96, pp. 305-322. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.005>.
- Ni-Bing, C.; Jia-Wei, L.; Ting, F. M. C. y N. Hartshorn (2018), "Global Policy Analysis Of Low Impact Development for Stormwater Management in Urban Regions", *Land Use Policy*, 70, pp. 368-383. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.024>.
- Hu, M.; Sayama, T.; Zhang, X.; Tanaka, K.; Takara, K. y H. Yang (2017), "Evaluation of Low Impact Development Approach for Mitigating Flood Inundation at a Watershed Scale in China", *Journal of Environmental Management*, 193, pp. 430-438. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.020>.
- Kamali, M.; Delkash, M. y M. Tajrishy (2017), "Evaluation of Permeable Pavement Responses to Urban Surface Runoff", *Journal of Environmental Management*, 187, pp. 43-53. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027>.
- Kong, F.; Ban, Y.; Yin, H.; James, P. e I. Dronova (2017), "Modeling Stormwater Management at the City District Level in Response to Changes in Land Use and Low Impact Development", *Environmental Modelling & Software*, 95, pp. 132-142. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.021>.
- Law, E. P.; Diemont, S. A. W. y T. R. Toland (2017), "A Sustainability Comparison of Green Infrastructure Interventions using Emergy Evaluation", *Journal of Cleaner Production*, 145, pp. 374-385. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.039>.
- Li, F.; Liu, X.; Zhang, X.; Zhao, D.; Liu, H. y C. Zhou (2017), "Urban Ecological Infrastructure: An Integrated Network for Ecosystem Services and Sustainable Urban Systems", *Journal of Cleaner Production*, 163, pp. S12-S18. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.079>.
- Lizárraga-Mendiola, L.; Vázquez-Rodríguez, G.; Blanco-Piñón, A.; Rangel-Martínez Y. y M. González-Sandoval (2015), "Estimating the Rainwater Potential per Household in an Urban Area: Case Study in Central Mexico", *Water*, 7, pp. 4622-4637. Disponible en: [doi:10.3390/w7094622](https://doi.org/10.3390/w7094622).

- Lizárraga-Mendiola, L.; Vázquez-Rodríguez, G. A.; Lucho-Constantino, G. A.; Bigurra-Alzati, C. A.; Beltrán-Hernández, R. I.; Ortiz-Hernández, J. E. y L. D. López-León (2017), "Hydrological Design of Two Low-Impact Development Techniques in a Semi-Arid Climate Zone of Central Mexico", *Water*, 9, p. 561. Disponible en: doi:10.3390/w9080561.
- Lizárraga-Mendiola, L.; Bigurra-Alzati, C. A.; Paz-Casas, D. F.; Montiel-Palma, S.; González-Sandoval, M. R.; Castañeda-Robles, I. E.; López-León, L. D.; Olguín-Coca, F. J. y F. O. Lagarda-García (2017), "Empleo de jal como cementante en la elaboración de un concreto permeable", *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, vol. 4, pp. 1-11. En prensa.
- Martin-Mikle, C. J.; M.-de-Beurs, K.; Julian, J. P. y P. M. Mayer (2015), "Identifying Priority Sites for Low Impact Development (LID) in a Mixed-use Watershed", *Landscape and Urban Planning*, 140, pp. 29-41. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.002>.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2004), *Guía de diseño para la captación del agua de lluvia*, OPS/CEPIS/04.122, Lima, Perú.
- Ortiz-Hernández, J.; Lucho-Constantino, C.; Lizárraga-Mendiola, L.; Beltrán-Hernández, R. I.; Coronel-Olivares, C. y G. Vázquez-Rodríguez (2016), "Quality of Urban Runoff in Wet and Dry Seasons: A Case Study in a Semi-arid Zone", *Environmental Science Pollution Research*, 23, pp. 25156-25168. Disponible en: DOI:10.1007/s11356-016-7547-7.
- Palla, A.; Gnecco, I. y P. La-Barbera (2017), "The Impact of Domestic Rainwater Harvesting Systems in Storm Water Runoff Mitigation at the Urban Block Scale", *Journal of Environmental Management*, 191, pp. 297-305. Disponible en: doi: 10.1016/j.jenvman.2017.01.025.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2017), *Pronóstico del tiempo por municipios*. Disponible en: <http://SMN.cna.gob.mx/es/pronostico-del-tiempo-por-municipios>. Consultado: 10 de septiembre de 2017.
- Soil Conservation Service, SCS (1999[1972]), *Soil Quality Test Kit Guide*, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- Su, M. D.; Lin, C. H.; Chang, L. F.; Kang, J. L. y M. C. Lin (2009), "A Probabilistic Approach to Rainwater Harvesting Systems Design and Evaluation", *Resources Conservation Recycling*, 53, pp. 393-399. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.005>.
- Winston, R. J.; Al-Rubaei, A. N.; Blecken, G. T.; Visklander, M. y W. F. Hunt (2016), "Maintenance Measures for Preservation and Recovery of Permeable Pavement Surface Infiltration Rate-The Effects of Street Sweeping, Vacuum Cleaning, High Pressure Washing, and Milling", *Journal of Environmental Management*, 169, pp. 132-144. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.026>.
- Zhan, W. y T. F. M. Chui (2016), "Evaluating the Life Cycle Net Benefit of Low Impact Development in a City", *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, pp. 295-304. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.006>.
- Zhang, K.; Yong, F.; McCarthy, D. y A. Delectic (2018), "Predicting Long Term Removal of Heavy Metals from Porous Pavements for Stormwater Treatment", *Water Research*, 142, pp. 236-245. Disponible en: doi: 10.1016/j.watres.2018.05.038.