

Soluciones basadas en la naturaleza y calidad del agua: Laboratorio de Adaptación al Cambio Climático basado en Infraestructura Verde LACCLIVE

Alexa Villalobos-Valverde

Escuela de Química

Instituto Tecnológico de Costa Rica

✉ alexavillalobosv@gmail.com

Andrey Caballero-Chavarría

Escuela de Química

Instituto Tecnológico de Costa Rica

✉ acaballero@itcr.ac.cr

Fernando Watson-Hernández

Escuela de Ingeniería Agrícola

Instituto Tecnológico de Costa Rica

✉ fwatson@itcr.ac.cr

Karolina Villagra-Mendoza

Escuela de Ingeniería Agrícola

Instituto Tecnológico de Costa Rica

✉ kvillagra@itcr.ac.cr

Fecha de recepción: 28/7/2024 | Fecha de aprobación: 24/11/2025

Resumen

Este artículo presenta la investigación desarrollada en el Laboratorio de Adaptación al Cambio Climático basado en Infraestructura Verde (LACCLIVE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), centrada en el análisis, diseño y evaluación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para infraestructura verde, con el objetivo de contribuir al bienestar humano y ecológico. Se destaca la relevancia de las SbN en la gestión integral de aguas pluviales, tanto en términos de cantidad como de calidad. El LACCLIVE se posiciona como una plataforma experimental única en la región, que permite evaluar el desempeño hidrológico y la capacidad de remoción de contaminantes de diversas tecnologías de infraestructura verde bajo condiciones controladas.

Palabras clave: calidad escorrentía, contaminantes urbanos, gestión aguas pluviales, laboratorio, soluciones basadas en la naturaleza (SbN)

Abstract

This article presents the research conducted at the Laboratory for Climate Change Adaptation Based on Green Infrastructure (LACCLIVE) of the Costa Rica Institute of Technology (ITCR), focused on the analysis, design, and evaluation of nature-based solutions (NbS) for green infrastructure, with the aim of contributing to both human and ecological well-being. The importance of NbS in the integrated management of stormwater—addressing both quantity and quality aspects—is emphasized. LACCLIVE is positioned as a unique experimental platform in the region, enabling the assessment of the hydrological performance and pollutant removal capacity of various green infrastructure technologies under controlled conditions.

Keywords: runoff quality, urban pollutants, stormwater management, laboratory, Nature-based solutions (NbS)

Introducción

El clima de Costa Rica está influenciado por diversos fenómenos naturales de gran escala, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la variabilidad del Atlántico, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), el chorro de bajo nivel del Caribe, tormentas tropicales, huracanes y frentes fríos. En las últimas décadas, la rápida y desordenada urbanización en la Gran Área Metropolitana (GAM), junto con factores como el aumento en la intensidad de las tormentas, la construcción en zonas de riesgo (como laderas inestables o cauces de ríos) y la falta de mantenimiento en los sistemas de drenaje pluvial, ha intensificado los efectos de los eventos extremos de precipitación, provocando inundaciones frecuentes y daños significativos en la infraestructura.

Tradicionalmente, la gestión de aguas pluviales en el país se ha centrado en la construcción de lagunas de compensación pluvial para proyectos residenciales o edificaciones con grandes superficies techadas [1]. No obstante, ante la creciente necesidad de aumentar la resiliencia urbana frente a las inundaciones, diversos países han adoptado Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) como una estrategia sostenible para la gestión del agua pluvial [2]. Estas soluciones buscan replicar los procesos naturales de drenaje, reduciendo tanto el volumen como la carga contaminante de la escorrentía urbana [3]. Aunque las SbN han sido ampliamente implementadas en regiones de Europa, Asia y algunos países de América, existe aún una limitada evidencia sobre su desempeño en condiciones tropicales [4], lo que resalta la necesidad de cuantificar su eficacia y adaptabilidad en contextos latinoamericanos.

Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN)

El concepto de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) surge como respuesta a la necesidad de enfrentar los efectos del cambio climático, proteger la biodiversidad y promover medios de vida sostenibles [5]. Estas soluciones abordan riesgos ambientales a largo plazo mediante un enfoque integral que incorpora aspectos sociales, desarrollo socioeconómico y principios de gobernanza [5]. La Figura 1 presenta los tres tipos de SbN, clasificados según el grado de intervención en los ecosistemas, junto con ejemplos representativos de cada categoría.

En este contexto, el enfoque de "ciudades verdes" promueve la restauración de la biodiversidad urbana, la reconexión de las personas con la naturaleza, la recarga de acuíferos, la mejora de la calidad del aire mediante la evapotranspiración vegetal y la creación de entornos urbanos más saludables y atractivos [1].

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Intervención mínima de los ecosistemas	Gestión o restauración de ecosistemas	Creación de nuevos ecosistemas
<ul style="list-style-type: none">• Protección de manglares• Creación áreas protegidas	<ul style="list-style-type: none">• Mejoras genéticas	<ul style="list-style-type: none">• Techos y muros verdes• Sistemas urbanos de drenaje sostenible

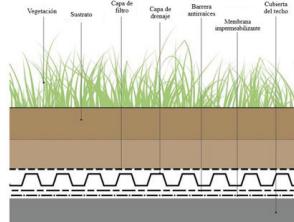
Figura 1. Tipos de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en función de la intervención de los ecosistemas y ejemplos asociados [5].

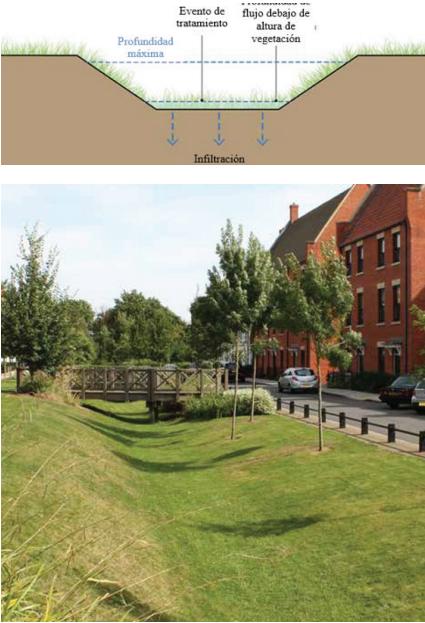
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y su rol en la calidad del agua

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), como parte de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), están diseñados para gestionar los riesgos ambientales asociados a la escorrentía urbana, replicando de forma eficiente el drenaje natural previo al desarrollo del sitio. Su objetivo es tratar el agua pluvial en la fuente, antes de que alcance cuerpos receptores o se infiltre en acuíferos. Sistemas como los cenagales, las bioretenciones y los techos verdes utilizan procesos naturales de filtración y

tratamiento biológico para mejorar la calidad del agua [6]. Además de complementar la infraestructura gris convencional, los SUDS ofrecen beneficios ambientales, estéticos, recreativos y socioeconómicos, al tiempo que reducen los impactos de las inundaciones urbanas y la contaminación hídrica, con un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia económica [7][8]. El Cuadro 1 presenta algunos de los SUDS más comúnmente utilizados.

Cuadro 1. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible más comunes

Estructura	Descripción	Características	
Techos verdes	Consiste en cubrir el techo con vegetación sobre una capa de drenaje.	<p>Sistema multicapa:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Membrana impermeabilizante • Barrera anti raíces • Drenaje • Filtro • Sustrato (medio de cultivo o suelo) • Vegetación 	 <p>Museo Horniman de Londres [3]</p>  <p>Techo verde en Belén, Heredia</p>
Zanjas de infiltración	Excavaciones poco profundas que se llenan con material permeable como escombros, piedras u otros medios que forman vacíos		 <p>Zanja de infiltración en vivienda [9]</p>

Estructura	Descripción	Características
Franjas filtrantes	franjas de tierra con pasto u otra vegetación densa uniformemente graduadas y con una suave pendiente diseñadas para recibir la escorrentía del desarrollo aguas arriba [3]	<p>Pendientes laterales poco profundas y fondo plano con una capa delgada de hierba o vegetación</p>  <p>El diagrama muestra un corte longitudinal de una franja filtrante. Se indica la 'Profundidad máxima' del terreno, el 'Evento de tratamiento' que alcanza esa profundidad, y el 'Flujo de desagüe de altura de vegetación'. Se muestra la 'Infiltración' de agua en el suelo. La foto muestra una franja filtrante real en un entorno urbano, con un puente peatonal y edificios de fondo.</p> <p>Upton, Northamptonshire [3]</p>

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) pueden ser diseñados para remover contaminantes específicos del agua pluvial directamente en la fuente [6]. Prácticas como la sedimentación y la filtración han demostrado ser eficaces para reducir la carga contaminante que llega a cuerpos receptores [10]. La escorrentía proveniente de superficies impermeables urbanas constituye una fuente difusa de contaminación, ya que proviene de múltiples orígenes asociados al uso del suelo y a la actividad humana [3][11]. Entre los contaminantes más comunes se encuentran sólidos en suspensión, aceites, sales, metales pesados (como plomo, zinc, cobre y cadmio), plaguicidas, materia orgánica, nutrientes, patógenos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), hidrocarburos de aceite mineral (MOH), compuestos halogenados y productos farmacéuticos [12][3][13]. Las principales fuentes incluyen la deposición atmosférica derivada de emisiones contaminantes, el tránsito vehicular y el uso de materiales metálicos en infraestructura urbana [14]. También se identifican fuentes naturales como residuos vegetales y suelos erosionados en bordes de carreteras, que aportan sedimentos, nutrientes, materia orgánica en descomposición y microorganismos [15]. El Cuadro 2 resume los principales contaminantes presentes en la escorrentía pluvial urbana.

Cuadro 2. Principales contaminantes encontrados en la escorrentía de las aguas pluviales

Contaminación	Fuente	Características	Impacto	Referencias
Material particulado	Carreteras, aparcamientos, tráfico vehicular,	Sólidos en suspensión que transportan metales pesados, hidrocarburos, nutrientes	Disminución de la biodiversidad acuática. Co-precipitación de metales traza absorbido	[16], [17]
Metales pesados	Atmósfera, actividades vehiculares, partículas de polvo contaminadas	Cadmio, Zinc, Plomo, Cobre, Cobalto, Hierro, Manganese	Organismos acuáticos, calidad de las aguas superficiales	[17] [18] [19]
Sustancias orgánicas	Vehículos, escorrentía, partículas de polvo contaminadas	Restos de vegetación y excreta animal, aceites, gasolina, líquido de frenos, sustancias descongelantes, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Agotamiento de oxígeno en cuerpos de agua	[15] [16] [18]
Sustancias inorgánicas	Precipitación, fertilizantes, escorrentía	Sulfatos, cloruro, amonio, nitratos, fosfatos	Agotamiento de oxígeno disuelto en cuerpos de agua, crecimiento de algas, alteración del pH del agua	[12] [13]
Microbiológica	Materia fecal humana y de animales, aguas residuales	<i>Escherichia coli</i> , coliformes termotolerantes, protozoos y virus	Enfermedades como <i>Cryptosporidium parvum</i> y la <i>Giardia duodenalis</i>	[16]

Infraestructura verde implementada en el LACCLIVE y el análisis de la calidad de la escorrentía

El Laboratorio de Adaptación al Cambio Climático basado en Infraestructura Verde (LACCLIVE), ubicado en la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica (TEC), fue establecido en 2023 como un espacio experimental para la construcción a escala de infraestructura verde. Su objetivo consiste en evaluar el desempeño de estas soluciones en términos de cantidad y calidad de la escorrentía generada. El laboratorio cuenta con diversas estructuras a escala, entre ellas: pavimento permeable, lagunas de retención y detención, sistemas de conducción pluvial vegetados, zanjas de infiltración y convencionales, franjas verdes y techos verdes.

A pesar de la creciente necesidad de soluciones efectivas frente a las inundaciones recurrentes en el país, Costa Rica carece de estudios integrales sobre infraestructura verde. En este contexto, el LACCLIVE adquiere relevancia nacional al generar evidencia técnica que respalde estrategias estructurales e innovadoras para la gestión sostenible del agua pluvial en entornos urbanos.



Figura 2. Estructuras implementadas en el Laboratorio de Adaptación al Cambio Climático basado en Infraestructura Verde (LACCLIVE), donde a) vista aérea del sitio en construcción, b) laguna de detención con vertedero, c) techos verdes y simulador de lluvia, d) instalación de compuerta, e) techos verdes a escala para evaluar contaminantes, f) franjas verdes a escala para evaluar contaminantes (Elaboración propia).

Se implementó una secuencia de estructuras verdes —compuesta por un techo verde, una zanja de infiltración y una franja verde— sobre la cual se aplicó una lluvia de diseño de 150 mm/h. La escorrentía generada contenía una concentración de 100 mg/L de bromuro de potasio (KBr) en agua destilada y 1000 mg/L de sólidos suspendidos totales (SST). Las muestras de escorrentía fueron recolectadas cada 5 minutos para construir el hidrograma del evento, y se utilizó una muestra compuesta para analizar la calidad del agua.



Figura 3. Esquema del montaje de la secuencia de infraestructuras verdes (Elaboración propia).

La secuencia de estructuras verdes lograron eficiencias mayores al 50% para la remoción de metales como Zn y Cu. Para los SST y la turbiedad se observaron eficiencias cercanas al 100%. En el caso del DBO se obtuvo una remoción del 50% después de tres eventos de lluvia, y los parámetros de pH y conductividad siempre mostraron valores mayores al valor de entrada.

Conclusión

El Laboratorio de Adaptación al Cambio Climático basado en Infraestructura Verde (LACCLIVE) representa un avance significativo para Costa Rica en la investigación aplicada sobre soluciones sostenibles para la gestión del agua pluvial en entornos urbanos tropicales. Como parte de la gestión de la escorrentía, la implementación de una secuencia de infraestructura verde compuesta por techo verde, zanja de infiltración y franja verde demostró ser una estrategia efectiva para mitigar la carga contaminante del agua de escorrentía. Finalmente, ante la falta de estudios integrales sobre infraestructura verde en Costa Rica, el LACCLIVE se posiciona como una herramienta clave para el desarrollo de estrategias estructurales e innovadoras que contribuyan a la resiliencia urbana frente al cambio climático.

Bibliografía

- [1] K. Vammen, "Desafíos del agua urbana en las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias, IANAS-UNESCO, 2015," *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, vol. 12, no. 3, 2015, doi: 10.22231/asyd.v12i3.238.
- [2] R. D'Ambrosio, A. Balbo, A. Longobardi, and A. Rizzo, "Re-think urban drainage following a SuDS retrofitting approach against urban flooding: A modelling investigation for an Italian case study," *Urban For Urban Green*, vol. 70, 2022, doi: 10.1016/j.ufug.2022.127518.
- [3] B. W. Ballard *et al.*, *The SuDS Manual*. London: Ciria, 2007.
- [4] K. Vijayaraghavan, "Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends," 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.119.
- [5] H. Eggermont *et al.*, "Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe," 2015. doi: 10.14512/gaia.24.4.9.
- [6] C. Dierkes, T. Lucke, and B. Helmreich, "General technical approvals for decentralised sustainable urban drainage systems (SuDS)-the current situation in Germany," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 7, no. 3, 2015, doi: 10.3390/su7033031.
- [7] M. Davis and S. Naumann, "Making the Case for Sustainable Urban Drainage Systems as a Nature-Based Solution to Urban Flooding," in *Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas, Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*, N. Kabisch, J. Stadler, H. Korn, and A. Bonn, Eds., Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017, pp. 123–135.
- [8] U. Srishantha and U. Rathnayake, "Sustainable urban drainage systems (SuDS) – What it is and where do we stand today?," 2017. doi: 10.14456/easr.2017.36.
- [9] SuDS Wales, "SuDS Techniques - Source Control." Accessed: Jun. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.sudswales.com/types/source-control/infiltration-trenches/>
- [10] E. Mancinelli, E. Baltrenaite, P. Baltrenas, D. Paliulis, G. Passerini, and A. R. Almas, "Trace metal concentration and speciation in storm water runoff on impervious surfaces," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 23, no. 1, 2015, doi: 10.3846/16486897.2014.936441.
- [11] M. T. I. Shajib, H. C. B. Hansen, T. Liang, and P. E. Holm, "Metals in surface specific urban runoff in Beijing," *Environmental Pollution*, vol. 248, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.02.039.
- [12] B. Wijesiri and A. Goonetilleke, "Urban Water Quality," in *Urban Stormwater and Flood Management*, 1st ed., V. Jegatheesan, A. Goonetilleke, J. van Leeuwen, J. Kandasamy, D. Warner, B. Myers, M. Bhuiyan, K. Spence, and G. Parker, Eds., Switzerland : Springer Cham, 2019, pp. 49–68.
- [13] P. Göbel, C. Dierkes, and W. G. Coldewey, "Storm water runoff concentration matrix for urban areas," *J Contam Hydrol*, vol. 91, no. 1–2, 2007, doi: 10.1016/j.jconhyd.2006.08.008.

- [14] A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, and M. Viklander, "The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources," 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136125.
- [15] A. Goonetilleke and J.-L. Lampard, "Stormwater Quality, Pollutant Sources, Processes, and Treatment Options," in *Approaches to Water Sensitive Urban Design*, A. Sharma, T. Gardner, and D. Begbie, Eds., Amsterdam: Elsevier , 2019, ch. 3, pp. 49–74. doi: 10.1016/B978-0-12-812843-5.00003-4.
- [16] F. Boogaard, F. van de Ven, J. Langeveld, and N. van de Giesen, "Stormwater Quality Characteristics in (Dutch) Urban Areas and Performance of Settlement Basins," *Challenges*, vol. 5, no. 1, 2014, doi: 10.3390/challe5010112.
- [17] J. Arias, "Variaciones en el uso de la tierra y sus implicaciones en el recurso hídrico en la subcuenca del Río Grande de San Ramón," in *Memoria Foro Interinstitucional sobre el Recurso Hídrico en la Región de Occidente*, 1st ed., M. Badilla and W. Solórzano, Eds., San José: Universidad de Costa Rica, 2017, pp. 49–62. [Online]. Available: <https://cidicer.so.ucr.ac.cr/recursos/publicacion/memoria-foro-interinstitucional-sobre-el-recurso-hidrico-en-la-region-de>
- [18] R. Masís Campos and H. Vargas Picado, "Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del río Burío," *Revista Reflexiones*, vol. 93, no. 1, 2014, doi: 10.15517/rr.v93i1.13742.
- [19] S. V. Chithra, N. Harindranathan, A. Amarnath, and N. S. Anjana, "Impacts of Impervious Surfaces on the Environment," *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 4, no. 5, 2015.

Sobre los autores

Alexa Villalobos-Valverde

Ingeniera Ambiental, Licenciatura en Ingeniería Ambiental. <https://orcid.org/0009-0008-3291-1307>

Andrey Caballero-Chavarría

Ingeniero Ambiental. Docente e Investigador de la Escuela de Química del TEC.
<https://orcid.org/0000-0002-5584-8821>

Fernando Watson-Hernández

Ingeniero Agrícola, con una maestría en Cambio Climático. Docente, investigador y extensionista de la Escuela de Ingeniería Agrícola del TEC. <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>

Karolina Villagra-Mendoza

Ingeniera Agrícola, con una maestría en Ingeniería Ambiental y un Doctorado en Ingeniería. Docente, investigadora y extensionista de la Escuela de Ingeniería Agrícola del TEC.
<https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>