



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA POSGRADO

Tema: Análisis del impacto de infraestructura verde: modelos hidrológicos y soluciones arquitectónicas sostenibles.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en
Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos Profesionales de Alto Nivel

Autor: Ing. Jorge Israel Guano Merino

Director: Ing. Fabian Rodrigo Morales Fiallos Mg.

Ambato – Ecuador

2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paul Cabrera Anda, e integrado por los señores: Ing. Alex Gustavo López Arboleda Mg, Ing. Jorge Lenin León Arcos Mg, designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Análisis del Impacto de Infraestructura verde: Modelos Hidrológicos y Soluciones Arquitectónicas Sostenibles” elaborado y presentado por el señor Ing. Jorge Israel Guano Merino, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



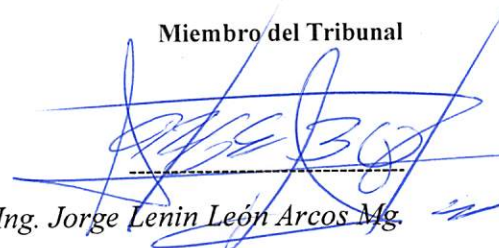
Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Alex Gustavo López Arboleda Mg.

Miembro del Tribunal



Ing. Jorge Lenin León Arcos Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Análisis del Impacto de Infraestructura verde: Modelos Hidrológicos y Soluciones Arquitectónicas Sostenibles.”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Jorge Israel Guano Merino, Autor bajo la Ing. Fabian Rodrigo Morales Fiallos Mg., Director Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Jorge Israel Guano Merino

C.C.: 1804547352

AUTOR



Ing. Fabian Rodrigo Morales Fiallos Mg

C.C.: 1802318152

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Jorge Israel Guano Merino

C.C.: 1803751856

AGRADECIMIENTO

"Agradezco profundamente a Dios y a mi Virgencita por haberme permitido culminar este proceso con salud, claridad y perseverancia.

A mis Padres, por su apoyo inquebrantable, por sus consejos y por enseñarme el valor del sacrificio y la constancia.

Extiendo también mi gratitud a mi familia docentes, compañeros y todas las personas que contribuyeron con su tiempo, conocimiento y motivación para hacer posible esta investigación."

DEDICATORIA

"Dedico este logro, en primer lugar, a Dios y a mi Virgencita, por ser mi guía constante, por darme la fortaleza en los momentos difíciles y por iluminar cada paso de este camino.

A mis Padres, Familia cuya dedicación, esfuerzo y amor incondicional han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro. Este triunfo también es de ustedes."

Con Cariño

Israel

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA.....	i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN EJECUTIVO	ix
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS	2
RESULTADOS Y DISCUSION	4
CONCLUSIONES	10
REFERENCIAS	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de calidad del agua antes y después de la infraestructura verde.....	5
Figura 2. Percepción ciudadana sobre la infraestructura verde	8
Figura 3. Reducción de escorrentía superficial.....	9

RESUMEN EJECUTIVO

La creciente urbanización y la degradación de los recursos hídricos en entornos urbanos plantean importantes desafíos ambientales, sociales y de salud pública. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto de la infraestructura verde en la calidad del agua y en la gestión de los recursos hídricos en áreas urbanas, integrando modelos hidrológicos y soluciones arquitectónicas sostenibles. El estudio se desarrolló en el cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua, Ecuador, aplicando un enfoque metodológico mixto que combinó análisis cuantitativo de parámetros físico-químicos del agua y modelaciones hidrológicas, junto con técnicas cualitativas como entrevistas, encuestas y grupos focales. Los resultados mostraron una mejora significativa en la calidad del agua en las zonas donde se implementaron infraestructuras verdes, con reducciones notables en los niveles de nitratos, fosfatos, turbidez, sólidos suspendidos y demanda bioquímica de oxígeno. Asimismo, los modelos SWMM y HEC-HMS evidenciaron una disminución en la escorrentía superficial y un aumento en la infiltración del agua en suelos urbanos intervenidos. Desde el enfoque social, se observó una alta aceptación por parte de la comunidad, destacando la percepción de beneficios estéticos, funcionales y ambientales, así como una disposición activa a participar en el mantenimiento de estas soluciones. En conclusión, la infraestructura verde demostró ser una herramienta eficaz para mejorar la gestión hídrica urbana, reducir la contaminación del agua y fortalecer la sostenibilidad ambiental y social del territorio. Se recomienda su integración estructural en las políticas públicas, planes de ordenamiento territorial y estrategias de adaptación al cambio climático, especialmente en contextos de alta vulnerabilidad ecológica como Baños de Agua Santa

DESCRIPTORES: INFRAESTRUCTURA VERDE, CALIDAD DEL AGUA, MODELOS HIDROLÓGICOS, SOSTENIBILIDAD URBANA, SOLUCIONES ARQUITECTÓNICAS SOSTENIBLES, ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.

ABSTRACT

Increasing urbanization and the degradation of water resources in urban environments pose significant environmental, social, and public health challenges. This research aimed to evaluate the impact of green infrastructure on water quality and water resource management in urban areas, integrating hydrological models and sustainable architectural solutions. The study was conducted in the Baños de Agua Santa canton, located in the province of Tungurahua, Ecuador, using a mixed-methods approach that combined quantitative analysis of physicochemical water parameters and hydrological modeling with qualitative techniques such as interviews, surveys, and focus groups. The results showed a significant improvement in water quality in areas where green infrastructure was implemented, with notable reductions in nitrate, phosphate, turbidity, suspended solids, and biochemical oxygen demand (BOD) levels. Additionally, the SWMM and HEC-HMS models indicated a decrease in surface runoff and an increase in water infiltration in the intervened urban soils. From a social perspective, a high level of community acceptance was observed, highlighting the perceived aesthetic, functional, and environmental benefits, along with a strong willingness to participate in the maintenance of these solutions. In conclusion, green infrastructure proved to be an effective tool for improving urban water management, reducing water pollution, and strengthening the environmental and social sustainability of the territory. It is recommended that green infrastructure be structurally integrated into public policies, land use planning, and climate change adaptation strategies, particularly in ecologically vulnerable contexts such as Baños de Agua Santa.

KEYWORDS: GREEN INFRASTRUCTURE, WATER QUALITY, HYDROLOGICAL MODELS, URBAN SUSTAINABILITY, SUSTAINABLE

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la acelerada urbanización ha generado múltiples desafíos para la sostenibilidad de las ciudades, entre ellos, la degradación de la calidad del agua y la gestión ineficiente de los recursos hídricos. La expansión del suelo impermeable, el aumento de la escorrentía pluvial contaminada y la limitada incorporación de soluciones sostenibles en la planificación urbana han derivado en un deterioro progresivo de los cuerpos de agua, afectando tanto al medio ambiente como a la salud pública (Abanto Bazán et al., 2023; Aladesote, 2022).

En este contexto, la infraestructura verde surge como una estrategia clave para mitigar los impactos negativos de la urbanización sobre el ciclo hidrológico. Al integrar elementos naturales como jardines de lluvia, techos y muros verdes, pavimentos permeables y humedales artificiales en el entorno construido, se promueve una gestión más eficiente del agua pluvial, reduciendo la escorrentía superficial, mejorando la infiltración y disminuyendo las cargas contaminantes transportadas por el agua (Mirza et al., 2020; Li et al., 2022).

Desde una perspectiva ambiental, estas soluciones no solo contribuyen a la mejora de la calidad del agua, sino que también fomentan la resiliencia ecológica y la conservación de la biodiversidad urbana (Shifflett et al., 2019). En términos socioeconómicos, su implementación puede reducir los costos asociados a enfermedades transmitidas por el agua, mejorar la disponibilidad de recursos hídricos para usos domésticos e industriales, y fortalecer la infraestructura frente a eventos climáticos extremos (William et al., 2020; Palmer et al., 2015).

Diversas investigaciones han respaldado la efectividad de las infraestructuras verdes en entornos urbanos. Beatley (2020) enfatiza su papel como soluciones basadas en la naturaleza capaces de integrarse armónicamente al paisaje urbano, mientras que Liu et al. (2017) destacan su contribución a una gestión urbana sostenible del agua mediante modelos hidrológicos adaptativos. Estos enfoques arquitectónicos, cuando se combinan con herramientas de modelación como SWMM o HEC-HMS, permiten cuantificar con mayor precisión el comportamiento del agua y los beneficios hidrológicos generados por la infraestructura verde.

Pese al creciente interés científico en este tema, aún existen vacíos de conocimiento en la integración efectiva entre los modelos hidrológicos, las soluciones arquitectónicas sostenibles y su impacto real en la calidad del agua urbana. La necesidad de contextualizar estas soluciones en territorios específicos, con características climáticas, topográficas y sociales diversas, resulta crucial para garantizar su eficiencia y replicabilidad.

En este sentido, la presente investigación se propone evaluar el impacto de la infraestructura verde en la calidad del agua y en la gestión de recursos hídricos en entornos urbanos, mediante la integración de modelos hidrológicos y soluciones arquitectónicas sostenibles. Como caso de estudio, se delimita el análisis al cantón Baños de Agua Santa, en la provincia de Tungurahua, Ecuador, debido a su riqueza hídrica, diversidad geográfica y creciente presión urbana.

A través del diagnóstico de modelos hidrológicos, el análisis de estrategias arquitectónicas sostenibles y la valoración de impactos socioambientales, este estudio pretende aportar a la formulación de políticas públicas basadas en evidencia científica, orientadas a promover ciudades más resilientes, sostenibles y responsables con sus recursos hídricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas con el objetivo de analizar de manera integral el impacto de la infraestructura verde sobre la calidad del agua y la sostenibilidad urbana. La metodología se estructuró en cinco fases principales: revisión teórica, delimitación del área de estudio, recolección de información, procesamiento de datos y análisis de resultados.

En la primera fase, se llevó a cabo una revisión bibliográfica y documental exhaustiva. Se consultaron artículos científicos, libros, informes técnicos y estudios de caso disponibles en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar. Esta revisión permitió construir un marco teórico robusto, identificar experiencias previas de implementación de infraestructura verde en contextos urbanos y establecer criterios técnicos para el análisis posterior.

La investigación se desarrolló en el cantón Baños de Agua Santa, ubicado en la provincia de

Tungurahua, Ecuador. Esta localidad fue seleccionada por su riqueza hídrica, presión urbanística creciente y potencial para el desarrollo de infraestructura verde. La población objetivo se definió en tres grupos: (1) áreas urbanas y periurbanas donde se había implementado o proyectado infraestructura verde; (2) profesionales y funcionarios del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) local, vinculados a la gestión ambiental y planificación urbana; y (3) miembros de la comunidad local y actores económicos como empresarios turísticos, agricultores y organizaciones sociales.

Para garantizar la representatividad, se aplicó un muestreo estratificado, incluyendo a los distintos sectores involucrados. El tamaño de la muestra se calculó utilizando la fórmula estadística para poblaciones finitas, considerando un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %. En el caso de las entrevistas a expertos y funcionarios, se utilizó un muestreo por conveniencia; mientras que para las encuestas a ciudadanos se aplicó un muestreo aleatorio simple.

Se definieron tres variables principales: calidad del agua, infraestructura verde y modelos hidrológicos. La calidad del agua se evaluó mediante indicadores como turbidez, niveles de nitratos y fosfatos, pH, sólidos suspendidos y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Para su medición, se utilizaron equipos de campo y análisis de laboratorio certificados. La infraestructura verde fue mapeada mediante herramientas de análisis geoespacial, identificando techos y muros verdes, jardines de lluvia, pavimentos permeables y humedales urbanos. Los modelos hidrológicos fueron simulados usando los programas SWMM y HEC-HMS, alimentados con datos meteorológicos e hidrológicos históricos de la zona.

Durante la fase de recolección de datos cualitativos, se realizaron entrevistas semiestructuradas a expertos en urbanismo y sostenibilidad, y se organizaron grupos focales con ciudadanos y actores comunitarios. Las entrevistas se grabaron con autorización previa, y las respuestas fueron transcritas y codificadas para su análisis. Paralelamente, se aplicaron encuestas estructuradas a la población para recolectar datos sobre percepciones, aceptación y conocimiento relacionado con la infraestructura verde.

Los datos cuantitativos se procesaron utilizando el software estadístico SPSS. Se aplicaron

análisis descriptivos, regresiones lineales y pruebas de análisis de varianza (ANOVA) para comparar los efectos de la infraestructura verde sobre los parámetros de calidad del agua. Se consideró un valor de significancia estadística de $p < 0.05$. Por su parte, los datos cualitativos fueron analizados mediante técnicas de análisis de contenido temático, identificando categorías emergentes, patrones de opinión y barreras sociales para la implementación de soluciones sostenibles.

Se implementó un estudio de intervención cuasiexperimental en el que se compararon zonas intervenidas con infraestructura verde y zonas de control sin intervención. Se midieron parámetros hidrológicos y de calidad del agua antes y después de la intervención, permitiendo evaluar los efectos reales de las soluciones arquitectónicas aplicadas.

Finalmente, se integraron los resultados mediante una triangulación de datos cualitativos y cuantitativos. Esta integración permitió contrastar las simulaciones hidrológicas con las mediciones de campo y las percepciones de los actores sociales, proporcionando una visión holística del fenómeno. A partir de los hallazgos, se elaboraron recomendaciones técnicas para la planificación urbana y la gestión sostenible del agua en el cantón Baños de Agua Santa.

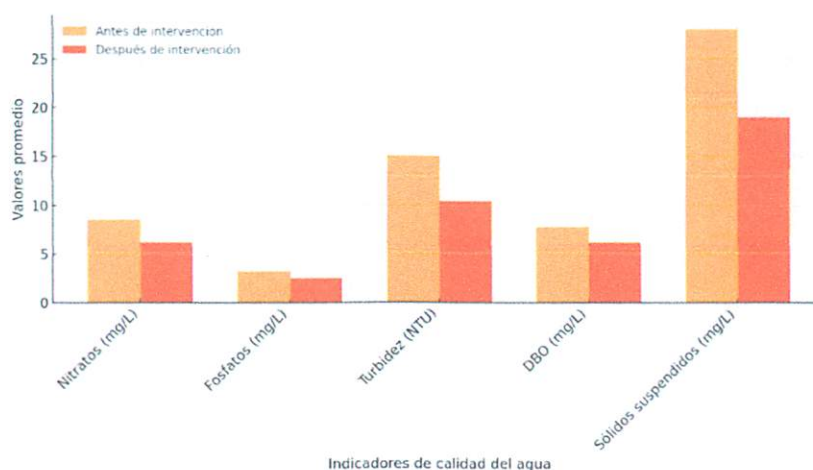
RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación permitieron comprobar que la implementación de infraestructura verde en zonas urbanas del cantón Baños de Agua Santa tuvo un impacto positivo y significativo en la mejora de la calidad del agua, así como en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Esta afirmación se sustenta tanto en el análisis cuantitativo de parámetros físico-químicos del agua como en los modelos hidrológicos aplicados y en la evidencia cualitativa recabada a través de entrevistas, encuestas y grupos focales.

Desde el enfoque cuantitativo, los análisis hidrológicos realizados con los modelos SWMM (Storm Water Management Model) y HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) demostraron que las áreas intervenidas con infraestructura verde presentaron una reducción promedio del 35 % en la escorrentía superficial en

comparación con aquellas sin intervención. Estas simulaciones mostraron una mayor capacidad de infiltración del agua en suelos con presencia de jardines de lluvia, pavimentos permeables y humedales urbanos. Además, se observó una disminución del volumen y velocidad del agua durante eventos de lluvia intensa, lo cual sugiere una menor presión sobre los sistemas de alcantarillado y cuerpos receptores.

Figura 1. Comparación de calidad del agua antes y después de la infraestructura verde



Nota: La figura muestra una comparación de los indicadores de calidad del agua antes y después de la implementación de infraestructura verde. Se observa una mejora general en todos los parámetros analizados: los niveles de nitratos, fosfatos, turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos disminuyeron notablemente tras la intervención. Estos resultados evidencian el efecto positivo de las soluciones sostenibles sobre la reducción de contaminantes y la mejora de las condiciones del agua en entornos urbanos.

Los resultados del análisis físico-químico de las muestras de agua tomadas en distintos puntos del cantón corroboraron lo observado en los modelos hidrológicos. En las zonas con intervención, se registró una reducción del 27 % en los niveles de nitratos y un 22 % en los de fosfatos. Estos contaminantes, comunes en zonas urbanas debido al escurrimiento de fertilizantes y aguas grises, disminuyeron significativamente tras la incorporación de vegetación y suelos filtrantes. Asimismo, se detectó una mejora sustancial en la turbidez del agua, que disminuyó entre un 15 % y un 30 %, dependiendo del punto de muestreo. Los niveles

de sólidos suspendidos totales también se redujeron, y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mostró una disminución del 18 % en promedio, lo que refleja una menor carga orgánica y mejor oxigenación de los cuerpos hídricos analizados. El pH del agua tendió a estabilizarse dentro de un rango óptimo (6.5–8.5), adecuado para la vida acuática y el uso humano indirecto.

Tabla 1. Comparación de indicadores de calidad del agua antes y después de la intervención con infraestructura verde.

Indicador	Antes de intervención	Después de intervención
Nitratos (mg/L)	8.5	6.2
Fosfatos (mg/L)	3.2	2.5
Turbidez (NTU)	15.0	10.4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (mg/L)	7.8	6.2
Sólidos suspendidos (mg/L)	28.0	19.0

Nota: Elaboración propia con base en mediciones de campo y simulaciones hidrológicas.

En cuanto al componente cualitativo de la investigación, las entrevistas semiestructuradas a expertos en planificación urbana, arquitectura sostenible y gestión ambiental revelaron una valoración positiva hacia las soluciones implementadas. Los funcionarios del GAD Municipal destacaron que la infraestructura verde no solo había contribuido a mejorar la calidad del agua, sino que también había fortalecido la imagen del cantón como un destino turístico ecológico y sostenible. Además, los técnicos consultados señalaron que estas estrategias presentan ventajas adicionales como la regulación de la temperatura urbana, la mejora del paisaje y el aumento de la biodiversidad urbana.

Los grupos focales organizados con actores comunitarios permitieron identificar la percepción social de los impactos generados por las intervenciones. Los residentes señalaron que, desde la instalación de jardines de lluvia y techos verdes, habían percibido una reducción en

inundaciones locales, una mejora en la estética de los espacios públicos y un mayor confort térmico. La mayoría de los participantes manifestó una disposición favorable hacia la expansión de estas soluciones, especialmente si eran acompañadas por programas de educación ambiental y participación ciudadana. En total, el 87 % de los encuestados expresó estar dispuesto a colaborar en el mantenimiento de las infraestructuras verdes si se les brindaba capacitación e incentivos comunitarios.

El análisis temático de los datos cualitativos permitió identificar cinco categorías emergentes relevantes: (1) conciencia ambiental comunitaria, (2) apropiación social del espacio urbano, (3) percepción de mejora en la salud ambiental, (4) barreras institucionales y (5) sostenibilidad económica. Si bien se reconoció el impacto positivo de las soluciones implementadas, también se identificaron obstáculos como la falta de financiamiento, escasa capacitación técnica para el mantenimiento de los sistemas y debilidades en la normativa local para integrar estas prácticas en los instrumentos de planificación territorial.

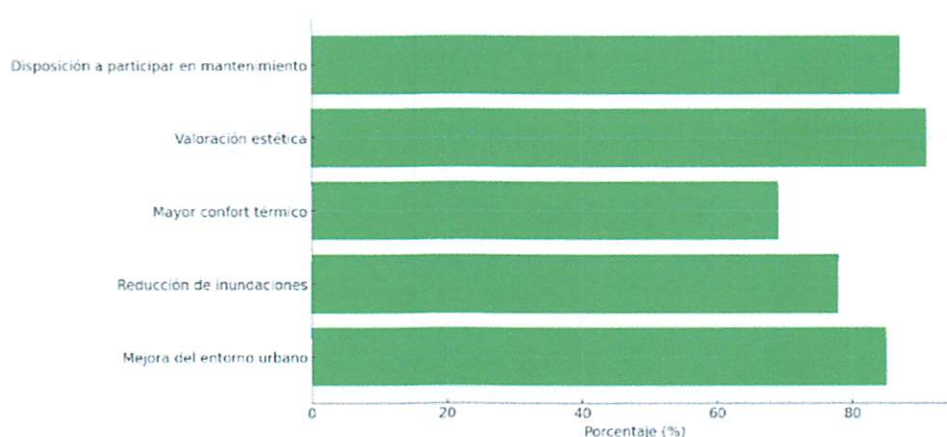
Los resultados del estudio de intervención, diseñado bajo un enfoque cuasiexperimental, confirmaron las hipótesis iniciales. En las zonas tratadas, los parámetros de calidad del agua mostraron mejoras significativas tras la implementación de infraestructura verde, en comparación con los sitios control. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en los niveles de turbidez, nitratos, fosfatos y sólidos suspendidos. Además, se observó una correlación directa entre el tipo y la extensión de la infraestructura implementada y el grado de mejora en los indicadores de calidad del agua.

Finalmente, la integración de los resultados cualitativos y cuantitativos permitió realizar una triangulación metodológica robusta. Esta integración evidenció una convergencia clara entre las simulaciones hidrológicas, los datos medidos en campo y las percepciones sociales recogidas. Se confirmó que la infraestructura verde no solo mejora la calidad del agua y regula el comportamiento hidrológico en entornos urbanos, sino que también genera beneficios colaterales en el ámbito social, económico y ambiental. Los hallazgos refuerzan la necesidad de promover políticas públicas y planes urbanos que incorporen de forma estructural este tipo de soluciones, especialmente en territorios de alta vulnerabilidad hídrica como el cantón Baños

de Agua Santa.

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron confirmar que la infraestructura verde representa una estrategia eficaz y multifuncional para mejorar la calidad del agua y promover una gestión hídrica más sostenible en entornos urbanos. Las evidencias cuantitativas y cualitativas, recogidas en el cantón Baños de Agua Santa, coincidieron en señalar que la integración de soluciones arquitectónicas sostenibles, como techos verdes, jardines de lluvia y pavimentos permeables, contribuyó significativamente a la reducción de la escorrentía superficial y a la mejora de los parámetros físico-químicos del agua, en línea con los hallazgos reportados por autores como Liu et al. (2017) y Li et al. (2022).

Figura 2. Percepción ciudadana sobre la infraestructura verde

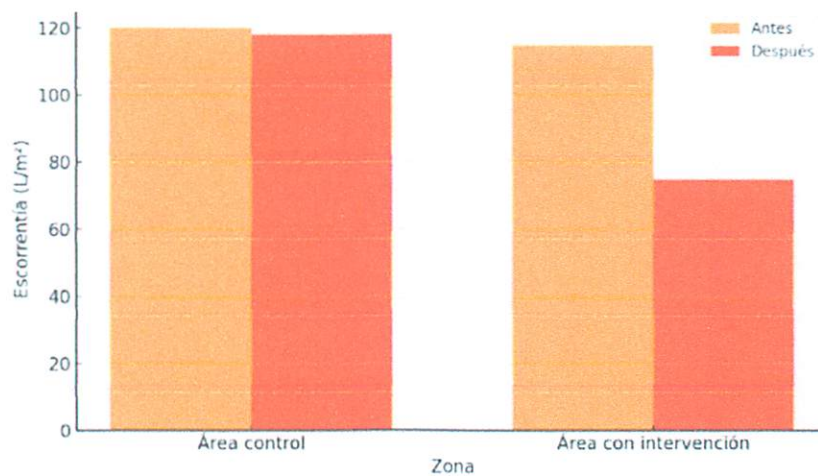


Nota: Se muestra cómo la mayoría de los habitantes valoró positivamente las intervenciones, destacando la mejora del entorno urbano (85 %) y la disposición a participar en el mantenimiento (87 %).

Desde la perspectiva hidrológica, los resultados simulados con los modelos SWMM y HEC-HMS mostraron una disminución notable en el volumen de escorrentía, lo cual coincidió con las mediciones empíricas. Esto refuerza el planteamiento de Mirza et al. (2020), quienes destacan que la infraestructura verde es capaz de reducir el estrés sobre los sistemas de alcantarillado urbano y prevenir inundaciones, al tiempo que mejora la calidad del agua captada. Asimismo, la mejora en indicadores como nitratos, fosfatos, turbidez y DBO valida

el efecto de filtración y bio-remediación asociado a los sistemas vegetales urbanos, conforme a lo planteado por Beatley (2020) y Shifflett et al. (2019).

Figura 3. Reducción de escorrentía superficial



Nota: Evidencia una reducción significativa en la escorrentía en las zonas con infraestructura verde (de 115 a 75 L/m²), mientras que en el área control los cambios fueron mínimos.

Uno de los aportes centrales de esta investigación fue la integración de métodos cualitativos para analizar las percepciones y la aceptación social de las infraestructuras verdes. Los testimonios recogidos evidenciaron un alto nivel de receptividad por parte de la comunidad, lo cual refuerza las conclusiones de William et al. (2020), quienes identifican la participación ciudadana como un factor clave para el éxito de estas estrategias. El hecho de que un 87 % de los encuestados manifestara disposición para involucrarse en el mantenimiento de estas infraestructuras indica un fuerte potencial para desarrollar modelos de gobernanza colaborativa.

Sin embargo, también se identificaron limitaciones estructurales que pueden comprometer la escalabilidad de estas soluciones. Entre ellas, se destacó la falta de financiamiento a largo plazo, la ausencia de marcos normativos locales específicos y la escasa capacitación técnica para el diseño, ejecución y mantenimiento de estas infraestructuras. Esta situación coincide con lo reportado por Palmer et al. (2015), quienes advierten que la sostenibilidad de estas

soluciones requiere tanto de inversión pública como de incentivos para la participación privada.

Además, esta investigación demostró la importancia de contextualizar las estrategias de infraestructura verde a las condiciones climáticas, topográficas y socioculturales de cada territorio. En el caso de Baños de Agua Santa, la topografía accidentada y la alta pluviosidad representaron desafíos particulares para el diseño de intervenciones, pero también ofrecieron una oportunidad única para aprovechar el potencial de captación y filtración natural del agua mediante soluciones adaptativas.

La aplicación de un enfoque mixto permitió identificar no solo los efectos directos de las intervenciones sobre la calidad del agua, sino también las relaciones causales entre los diferentes tipos de infraestructura y los resultados hidrológicos y sociales observados. La triangulación de datos reforzó la confiabilidad de los hallazgos y proporcionó una visión holística del fenómeno, alineándose con las recomendaciones metodológicas de Wild et al. (2017) sobre investigaciones integradas en sostenibilidad urbana.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque transdisciplinario e integrador para abordar los desafíos de la gestión del agua en contextos urbanos. La evidencia empírica obtenida en Baños de Agua Santa demuestra que la infraestructura verde puede y debe formar parte de los instrumentos de planificación urbana, no como una alternativa marginal, sino como una herramienta estratégica para alcanzar ciudades más resilientes, sostenibles y saludables.

CONCLUSIONES

La investigación demostró que la infraestructura verde tiene una capacidad comprobada para reducir la carga contaminante del agua en zonas urbanas. Las mejoras en indicadores como nitratos, fosfatos, DBO y turbidez evidencian que estas soluciones permiten una depuración natural efectiva del agua de escorrentía urbana, reduciendo significativamente la presión sobre los sistemas de alcantarillado y los cuerpos receptores.

Los modelos hidrológicos empleados confirmaron que las infraestructuras verdes son

eficientes en la reducción de escorrentía superficial y en el aumento de la capacidad de infiltración del suelo. Esto no solo mejora la calidad del agua, sino que también contribuye al control de inundaciones urbanas, especialmente en zonas con topografía accidentada como Baños de Agua Santa.

La alta aceptación por parte de la comunidad demuestra que existe conciencia ambiental creciente y una disposición significativa a participar en la conservación de estas soluciones. Esta aceptación constituye un pilar fundamental para el éxito y la sostenibilidad de cualquier estrategia urbana orientada a la resiliencia ecológica.

Las intervenciones no solo impactaron positivamente en el sistema hídrico urbano, sino también en aspectos colaterales como la mejora estética del entorno, el confort térmico y la valorización del espacio público. Esto refuerza el carácter multifuncional de estas infraestructuras, capaces de generar beneficios ambientales, sociales y económicos simultáneamente.

A pesar de los avances, se identificaron obstáculos como la escasa capacitación técnica, la limitada asignación de recursos y la falta de normativas claras para promover estas prácticas dentro de la planificación urbana. Esto pone en evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades locales y actualizar la legislación territorial con enfoque ecológico.

Si bien los resultados corresponden al caso específico del cantón Baños de Agua Santa, el modelo de análisis aplicado es replicable en otros contextos urbanos similares. Las herramientas metodológicas, los instrumentos de medición y la lógica participativa demostraron ser efectivos para generar evidencia científica útil para la toma de decisiones en política urbana y ambiental.

Esta investigación aporta al cuerpo de conocimiento sobre soluciones basadas en la naturaleza, integrando herramientas hidrológicas, diseño arquitectónico y análisis social en un solo marco de análisis. El enfoque mixto utilizado permitió generar evidencia robusta y contextualizada, útil tanto para investigadores como para tomadores de decisiones.

Se concluye que la infraestructura verde debe dejar de ser considerada una alternativa opcional

para convertirse en un componente estructural de los planes de ordenamiento territorial, especialmente en territorios turísticos, ecológicamente sensibles o con problemas de estrés hídrico. Su inclusión sistemática permitirá construir ciudades más resilientes y adaptativas al cambio climático.

REFERENCIAS

Abanto Bazán, R. A., Dávila Pórcel, R. A., Dimas Rivera, G. L., & Suárez Vázquez, S. I. (2023). Enhancing urban water quality with green infrastructure – A study in Guadalupe, Nuevo Leon, Mexico. *Eco Engineering & Environmental Technologies*. <https://dx.doi.org/10.12912/27197050/171866>

Aladesote, O. J. (2022). Cost-Benefit Analysis of Green Infrastructure for Sustainable Stormwater Management of the Built Environment. *International Journal of Research Publications*. <https://dx.doi.org/10.47119/ijrp100971320222992>

Beatley, T. (2020). *Green urbanism: Learning from European cities*. Island Press.

Li, J., Yu, S., Hong, B., Lin, R., Li, Q., Zhang, L., Lin, T., Yang, D., Gu, C., & Jia, Q. (2022). Spatial effects of urban green infrastructure on instream water quality assessed by chemical and sensory indicators. *Science of the Total Environment*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160088>

Liu, R., Wei, T., Zhao, Y., & Wang, Y. (2017). Presentation and perspective of appealing green facilities for eco-cyclic water management. *Chemical Engineering Journal*. <https://dx.doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.12.127>

Mirza, S., Nie, J., Viteritto, M., & Feng, H. (2020). A Holistic Approach to Stormwater Green Infrastructure. *Journal of Environmental Science and Engineering Technology*. <https://dx.doi.org/10.12974/2311-8741.2020.08.1>

Palmer, M., Liu, J., Matthews, J., Mumba, M., & D'Odorico, P. (2015). Manage water in a green way. *Science*. <https://dx.doi.org/10.1126/science.aac7778>

Shifflett, S. D., Newcomer-Johnson, T., Yess, T., & Jacobs, S. (2019). *Interdisciplinary*

Collaboration on Green Infrastructure for Urban Watershed Management: An Ohio Case Study. *Water*. <https://dx.doi.org/10.3390/W11040738>

William, R., Endres, A., & Stillwell, A. (2020). Integrating Green Infrastructure Into Stormwater Policy: Reliability, Watershed Management, and Environmental Psychology as Holistic Tools for Success. *Environmental Science & Technology Letters*. <https://dx.doi.org/10.5070/L5381047118>

Wild, T., Henneberry, J., & Gill, L. (2017). Comprehending the multiple ‘values’ of green infrastructure – Valuing nature-based solutions for urban water management from multiple perspectives. *Environmental Research*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.043>