



Recibido 05/12/2025
Aceptado 14/09/2026

CIENCIA CIUDADANA Y TIC PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DOMÉSTICOS: UNA REVISIÓN NARRATIVA

CITIZEN SCIENCE AND ICT FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF DOMESTIC WETLANDS: A NARRATIVE REVIEW

Ing. Elsa Gloria Benítez Manzo¹, Dra. Mariana Martínez Castrejón², Mtra. Mónica Zárate Juárez³, Dra. Claudia L. Manzano Jiménez⁴, Dra. Hilda J. Arellano Wences⁵

¹ Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco, México.

² Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco, México.

³ SECIHTI-UAGro Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco, México, UAGro Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, México.

⁵ Tecnológico Nacional de México/Campus Acapulco, México.

⁶ UAGro Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, México.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar la integración de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y la ciencia ciudadana en la gestión de humedales artificiales domésticos. Se realizó una revisión narrativa de literatura científica recuperada en Scopus y complementada con Google Scholar. Se examinaron doce estudios considerando tres ejes: TIC empleadas, nivel de participación ciudadana y beneficios y limitaciones reportados. Predominaron las iniciativas de nivel contributivo, donde la ciudadanía actúa principalmente como generadora de datos. Las TIC identificadas incluyen herramientas visuales, aplicaciones móviles, plataformas digitales y sensores de bajo costo que favorecen el monitoreo ambiental y la educación comunitaria. Entre las principales barreras destacan la brecha digital, la limitada conectividad y la falta de capacitación técnica. Los resultados evidencian avances en monitoreo ambiental, fortalecimiento de la gobernanza participativa y una aplicación aún incipiente en humedales domésticos. Se concluye que la integración de TIC y ciencia ciudadana puede contribuir a la sostenibilidad hídrica mediante procesos de inclusión digital y fortalecimiento comunitario.

PALABRAS CLAVE

Ciencia ciudadana, Gestión hídrica, Humedales artificiales, Participación comunitaria, Soluciones basadas en la naturaleza, TIC.

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the integration of information and communication technologies (ICT) and citizen science (CCS) in the management of constructed wetlands (CWs). A narrative review of the literature indexed in Scopus and Google Scholar was conducted. Twelve studies were examined under three analytical axes: i) type of ICT used, ii) citizen participation level, iii) socio-environmental benefits, and limitations. Most initiatives were found at the contributory level, conceiving citizens as data generators. The identified ICTs include visual tools, mobile applications, online platforms, and low-cost sensor systems, contributing to continuous monitoring and environmental education. The identified barriers to public participation were the digital divide, a lack of technical training, and limited connectivity in vulnerable regions. The trends revealed are a) technological advances in environmental monitoring, b) the strengthening of CCS as a governance tool, and c) the incipient application of these strategies in CWs. It is concluded that the synergy between ICT and community participation can enhance the sustainability of CWs. Digital inclusion, technical support programs, and public policies that strengthen their implementation are crucial. Pilot projects, decentralized monitoring networks, and digital literacy programs to support water management in vulnerable contexts are recommended.

KEYWORDS

Artificial wetlands, Citizen science, Community participation, ICT, Nature-based solutions, Water Management.

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales son soluciones basadas en la naturaleza (SbN) diseñados para reproducir, optimizar y controlar los procesos físicos, químicos y biológicos propios de los humedales naturales. Con esta SbN la sociedad enfrenta la gestión sostenible de diversos efluentes residuales como el agua gris doméstica. Su funcionamiento depende de la operación conjunta de plantas, microorganismos, sustratos filtrantes, oxígeno atmosférico y los nutrientes presentes en el agua a tratar. Los mecanismos de tratamientos que se involucran en estas SbN son la sedimentación, la filtración, la precipitación, la adsorción, la degradación microbiana y la asimilación vegetal [1, 2].

Estos sistemas se consideran de bajo costo porque son pasivos –operan sin energía eléctrica–, y ostentan una alta eficiencia de remoción de contaminantes. Estas cualidades los posicionan como una alternativa sostenible capaz de generar agua tratada para reúso agrícola, paisajístico o sanitario en línea con los principios de adaptación al cambio climático, economía circular y conservación ambiental [2, 3, 4].

Como SbN, los humedales artificiales aportan beneficios ecosistémicos, sociales y tecnológicos al reducir la presión sobre los recursos hídricos de fuentes primarias, fortalecer la resiliencia comunitaria ante la escasez del agua y los múltiples escenarios de implementación potencial.

Además, esta SbN promueve la aceptación social del agua residual tratada, la participación local por su sencilla implementación y el desarrollo de capacidades técnicas acompañado del fortalecimiento de la conciencia ambiental y de los saberes técnico-científicos [5]. Su demostrada eficacia en múltiples configuraciones y contextos, sumada a su potencial para integrarse en infraestructuras verdes urbanas, los convierte en una de las estrategias más versátiles y replicables para enfrentar la escasez hídrica en regiones vulnerables como Latinoamérica [6].

Por su parte, los humedales artificiales domésticos representan una alternativa ecológica y descentralizada para el tratamiento de aguas residuales, la reducción de contaminantes y la restauración de ecosistemas locales [7]. Sin embargo, su funcionamiento eficiente requiere mantenimiento continuo, monitoreo y apropiación social, factores que con frecuencia son limitantes en contextos rurales o urbanos marginados [8, 9].

En los últimos años, la ciencia ciudadana y las tecnologías de la información y comunicación (TIC) se han consolidado como herramientas complementarias para la gestión ambiental participativa. Estas permiten recopilar datos, fortalecer la educación ambiental y generar gobernanza local a través del uso de sensores, plataformas web, sistemas de información geográfica (SIG) y aplicaciones móviles [10].





La evidencia científica demuestra que los proyectos de ciencia ciudadana han mejorado el monitoreo de ecosistemas acuáticos y la comunicación entre investigadores y comunidades [11]. Sin embargo, los humedales domésticos aún están subrepresentados en la literatura académica, y pocos estudios documentan la aplicación simultánea de TIC y participación comunitaria en su gestión [12, 13].

2. MATERIALES Y MÉTODO

Se realizó una revisión narrativa de literatura científica indexada en Scopus, [14, 15]. La cadena de búsqueda fue: constructed wetlands, citizen science. Se identificaron 12 publicaciones de las cuales, se discriminaron 8 por no tratarse de artículos de investigación, ser trabajos puramente técnicos sin componente social y/o investigaciones no relacionadas con tratamientos domésticos o de participación comunitaria. Adicionalmente, se revisaron los trabajos más relevantes sobre humedales artificiales, TIC en Scopus para completar el marco conceptual, rescatando un capítulo de libro. Por otro lado, el corpus se completó con publicaciones obtenidas de Google Scholar para evitar omitir trabajos relevantes publicados fuera de Scopus. Dado el carácter emergente del tema y el reducido número de investigaciones que integran simultáneamente humedales domésticos, ciencia

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar la evidencia científica disponible en las bases de datos Scopus y Google Scholar sobre la integración de ciencia ciudadana y TIC en la gestión sostenible de humedales domésticos, identificando tendencias, brechas de conocimiento y oportunidades para fortalecer la participación social en la sostenibilidad hídrica.

ciudadana y TIC, el corpus recuperado permitió cubrir la totalidad de los estudios que cumplían los criterios de inclusión definidos. El corpus final de análisis se integró con 12 publicaciones, i.e., 4 artículos de Scopus, 1 capítulo de libro y 7 artículos de Google Scholar. La información fue sistematizada por categorías: tipo de TIC utilizada, nivel de participación ciudadana, beneficios ambientales y sociales, y limitaciones reportadas. La comparación cualitativa permitió identificar patrones comunes y vacíos de investigación [16]. El nivel de participación ciudadana fue determinado de acuerdo con la metodología propuesta por Haklay [17] (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles de participación ciudadana según Haklay.

Nivel de participación	Tipo de participación	Descripción general	Rol de la comunidad	Ejemplo aplicado a humedales / monitoreo hídrico
1. Contribuyente (Crowdsourcing)	Participación pasiva o contributiva	Los ciudadanos aportan datos siguiendo instrucciones, sin participar en el diseño o análisis.	Recolectar observaciones o mediciones simples (p. ej., tomar fotos, registrar niveles de agua, medir pH con kits).	Habitantes envían datos sobre calidad del agua mediante una app o formulario web; los investigadores analizan toda la información.
2. Colaborador (Distributed intelligence)	Participación activa moderada	Los ciudadanos no solo recogen datos, sino que ayudan a interpretarlos o validarlos. El diseño sigue siendo académico.	Identificar patrones, clasificar información o verificar resultados preliminares.	Vecinos ayudan a validar datos de sensores comunitarios o a identificar puntos críticos de contaminación.
3. Co-creador (Participatory science)	Participación activa alta	La comunidad participa junto con los científicos en el diseño del proyecto, definición de preguntas y recolección de datos.	Codiseñar protocolos, decidir qué monitorear y cómo usar los resultados.	Comunidades y universidad diseñan juntas un programa de monitoreo de humedales domésticos y definen qué variables medir.
4. Conducido por ciudadanos (Extreme citizen science)	Participación plena y autónoma	El proyecto es iniciado y dirigido por la comunidad; los científicos ofrecen asesoría técnica o validación.	Liderar todas las etapas: plantear preguntas, obtener y analizar datos, comunicar resultados.	Una comunidad rural crea su propio sistema de sensores y plataforma digital para vigilar descargas de aguas residuales, gestionando los datos sin mediación institucional.

3. RESULTADOS

El análisis comparativo de los estudios incluidos en la revisión (Tabla 2) muestra una notable diversidad en las formas de incorporación de las TIC dentro de iniciativas de ciencia ciudadana aplicadas al monitoreo ambiental y la gestión del agua.

Las tecnologías identificadas abarcan herramientas visuales, plataformas digitales, aplicaciones móviles y sistemas de monitoreo en tiempo real. Los beneficios más frecuentemente reportados incluyen el monitoreo de la calidad

del agua, el uso eficiente de los recursos naturales, la conservación de la biodiversidad y el fortalecimiento comunitario. Entre las limitaciones destacan la brecha digital, la conectividad limitada, la disponibilidad desigual de dispositivos tecnológicos y la necesidad de personal especializado para el procesamiento e interpretación de datos. Asimismo, predominan los esquemas contributivos de participación ciudadana sobre modalidades colaborativas o de co-creación.



Tabla 2. Tabla de Sistematización

Herramienta o estrategia TIC	Nivel de participación ciudadana	Beneficios ambientales y sociales	Limitaciones reportadas	Referencia
Compartir fotos y videos: Herramientas visuales populares para la identificación y documentación de eventos.	Contribuyente	Uso eficiente de recursos naturales	Desigualdad en el acceso digital	[18]
		Monitoreo en tiempo real de la calidad del aire y del agua	Brecha Digital y de Conectividad: La desigualdad en el acceso a Internet,	[19]
Cargas/subidas en línea (Online Upload): Envío de archivos (Word/PDF) a servidores de internet.	Contribuyente	Monitoreo de la calidad del agua	Limitaciones Tecnológicas y de Infraestructura, requieren sensores especializados que pueden ser costosos	[20]
Plataformas en línea: Estrategias principales para el entrenamiento y la interacción entre científicos y participantes.	Colaborador	Restauración y protección de los ecosistemas	Se requiere personal altamente calificado en teledetección, geoinformática y análisis estadístico	[21]
		Preservación de la diversidad biológica global	Falta generalizada de datos completos y actualizados	[22]
Aplicaciones para smartphones	Contribuyente	Conservación de la biodiversidad, Desarrollo Comunitario	Disponibilidad de teléfonos inteligentes	[23]

Estos resultados evidencian que, aunque existe una creciente diversidad tecnológica, la participación ciudadana continúa concentrándose en modalidades de baja intensidad, aspecto que será analizado en la siguiente sección.

4. DISCUSIÓN

Los resultados sintetizados en la Tabla 2 permiten identificar tres patrones principales en la literatura revisada. En primer lugar, la adopción de TIC se orienta principalmente al monitoreo ambiental y a la generación de datos, más que a procesos de toma de decisiones compartidas. En segundo lugar, predomina la participación ciudadana de carácter contributivo, donde la comunidad actúa como proveedora de información, mientras que las modalidades colaborativas y de co-creación continúan siendo menos frecuentes. Finalmente, los beneficios ambientales y sociales reportados suelen estar acompañados por limitaciones asociadas a la brecha digital, la conectividad y las capacidades técnicas disponibles en los territorios.

Las tecnologías empleadas abarcan desde herramientas básicas de comunicación visual —como el intercambio de fotografías o videos— hasta plataformas digitales y sistemas de sensores en tiempo real. Sin embargo, la mayoría de los casos se concentra en niveles contributivos de participación, donde los ciudadanos actúan principalmente como recolectores de información, sin intervenir en el diseño metodológico ni en la interpretación de los resultados. Este hallazgo coincide con las observaciones de Haklay [17], quien advierte que la ciencia ciudadana aún se encuentra predominantemente en etapas iniciales de involucramiento público. Este predominio puede responder a que los proyectos basados en monitoreo ambiental privilegian diseños metodológicos donde la participación ciudadana se orienta principalmente a la generación de datos, mientras que las etapas de definición de problemas, interpretación de resultados y toma de decisiones permanecen concentradas en equipos académicos o institucionales.

En términos ambientales, los beneficios reiterativos incluyen el monitoreo constante de la calidad del agua, la gestión optimizada de los recursos naturales y el fortalecimiento y promoción de la conciencia ambiental.

Con estos resultados se pone de manifiesto que las TIC ostentan un importante potencial para el fortalecimiento de la vigilancia ecológica y mejorar la eficiencia de los procesos locales de saneamiento y circularidad del recurso hídrico. Sin embargo, la revisión evidencia una brecha digital persistente entre el acceso a la tecnología y a la conectividad, principalmente en contextos rurales, marginales o de alto rezago social. Esta brecha restringe la equidad social y limita los programas participativos como también lo señalan la UNESCO [19] y Benyei [23], resaltando la necesidad de estrategias de inclusión tecnológica como condicionante del éxito de los proyectos a nivel comunitario. En consecuencia, la infraestructura tecnológica constituye una condición necesaria, pero no suficiente; su efectividad depende de procesos de alfabetización digital, acompañamiento institucional y construcción de confianza entre los distintos actores involucrados.

Por otro lado, los estudios que utilizan plataformas en línea y aplicaciones móviles muestran avances hacia modelos colaborativos entre investigadores y participantes fomentando la capacitación remota, el intercambio de datos y la retroalimentación en tiempo real. Sin embargo, esta modalidad ve limitada su adopción en comunidades con escaso acceso a recursos especializados porque requiere de infraestructura tecnológica, habilidades digitales y personal capacitado en teledetección y análisis de información geoespacial [21].

Las tendencias identificadas (Tabla 3) evidencian tres líneas de evolución en la literatura: (a) el perfeccionamiento tecnológico de los sistemas de monitoreo ambiental; (b) la consolidación de la ciencia ciudadana como herramienta educativa y de gobernanza ambiental; y (c) la aplicación incipiente de estas estrategias a los humedales domésticos.


Tabla 3. Tendencias Principales de la Revisión

Tendencia	Particularidades del estudio	Referencia
Avances tecnológicos en monitoreo ambiental.	Sensores de bajo costo, plataformas de datos abiertas, se reducen costos.	[10]
Ciencia ciudadana y aprendizaje ambiental.	Mayor inclusión y retroalimentación entre investigadores y voluntarios.	[24]
	Equidad social limitada,	[17]
	Generar conocimiento local y promover la conciencia ambiental	[11]
Aplicación a humedales domésticos.	Los humedales domésticos requieren estrategias de participación local más directas, capacitación y herramientas simples.	[7]
	Integración de sistemas inteligentes de monitoreo y ciencia ciudadana estructurada para fortalecer la gobernanza hídrica.	[25]

En este último caso, los estudios revisados coinciden en que la escala doméstica requiere mecanismos de participación directa y procesos de capacitación local que faciliten la apropiación social de las tecnologías [7, 12]. Además, investigaciones recientes como la de Domínguez-Solis et al. [25], sugieren la integración de sistemas inteligentes de monitoreo y esquemas de ciencia ciudadana estructurada como vías para fortalecer la gobernanza hídrica.

De manera crítica, se observa que las experiencias en América Latina están subrepresentadas. En esta región las condiciones socioambientales exigen enfoques híbridos que combinen saberes locales con innovación tecnológica. La ausencia de programas sostenidos en el tiempo, la falta de validación científica de los datos comunitarios y las limitaciones de conectividad dificultan la consolidación de proyectos a largo plazo. Superar estas barreras implica repensar la ciencia ciudadana no solo como una herramienta de monitoreo, sino como un proceso de co-producción de conocimiento y acción colectiva [6, 26, 27]. Esta ausencia limita la transferencia de evidencia hacia contextos caracterizados por desigualdad socioambiental, donde precisamente los humedales domésticos podrían representar una estrategia de saneamiento descentralizado con mayor impacto social.

En conjunto, estos hallazgos muestran que las limitaciones identificadas no invalidan el potencial de estas estrategias, sino que delimitan las condiciones institucionales y sociales necesarias para su implementación efectiva.

Con la revisión realizada se confirma la sostenibilidad hídrica y social de los humedales artificiales domésticos se potencia con la sinergia entre la ciencia ciudadana y la implementación y uso de TIC siempre y cuando se acompañe de programas de inclusión digital, fortalecimiento técnico y políticas públicas participativas que gestionen la continuidad y legitimidad del monitoreo comunitario [28, 29]. Este enfoque integrador permite transitar de la observación pasiva a la corresponsabilidad ambiental, articulando la innovación tecnológica con la justicia hídrica y la resiliencia territorial [4, 6, 27, 30].

De manera crítica, los humedales domésticos pueden reinterpretarse como laboratorios comunitarios de sostenibilidad, donde la convergencia entre ciencia, tecnología y acción ciudadana fomenta nuevas formas de aprendizaje social y corresponsabilidad ambiental. En este modelo, la innovación no radica únicamente en la herramienta tecnológica, sino en su capacidad para articular saberes locales con conocimiento científico, promoviendo una cultura hídrica equitativa, participativa y orientada al bien común.

5. CONCLUSIONES

Los humedales artificiales domésticos son soluciones basadas en la naturaleza para la gestión sostenible del agua residual a microescala con alto potencial de resiliencia socioambiental cuya gestión sostenible se ve favorecida con la integración estratégica de las TIC y la ciencia ciudadana.

En esta revisión se evidencia que la digitalización de los procesos de monitoreo puede democratizar el acceso al conocimiento ambiental, mejorar la transparencia en la gestión hídrica y fortalecer el empoderamiento comunitario en torno al cuidado del agua mediante la implementación de plataformas abiertas, sensores de bajo costo y sistemas colaborativos de información. Sin embargo, la sociedad enfrenta desafíos estructurales hacia la implementación de estas herramientas, asociados a la brecha digital, la desigualdad tecnológica y la discontinuidad institucional de los programas de gestión participativa. En este contexto, la consolidación de la gobernanza hídrica requiere que la infraestructura y la conectividad se articulen con procesos sostenidos de acompañamiento socio tecnológico que permitan la traducción de los datos obtenidos por las comunidades –ciencia ciudadana– en decisiones de política pública y acciones colectivas efectivas.

Las recomendaciones que se derivan del presente trabajo son: i) desarrollar proyectos piloto en América Latina que integren educación ambiental, TIC accesibles y mecanismos de seguimiento ciudadano, adaptados a las condiciones socioeconómicas locales; 2) establecer redes de monitoreo descentralizadas con soporte técnico-académico, que garanticen la calidad de los datos y fomenten la cooperación interinstitucional y 3) impulsar políticas de alfabetización digital y ambiental, priorizando la inclusión de mujeres, jóvenes y comunidades rurales como actores clave de la gestión hídrica.

Más allá de incorporar herramientas digitales al monitoreo ambiental, el principal aporte potencial de la ciencia ciudadana radica en transformar la relación de las comunidades con la gestión del agua. En este sentido, los humedales artificiales domésticos pueden convertirse en espacios de experimentación social donde el conocimiento científico, los saberes locales y las tecnologías digitales converjan para fortalecer formas más participativas, resilientes y territorialmente pertinentes de gobernanza hídrica.

6. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México, que se ha materializado en i) la Beca de Posgrado Nacional a nivel maestría otorgada a Elsa G. Benítez Manzo con el número de apoyo 4029189; ii) la Beca Nacional de Doctorado concedida a Mónica Zárate-Juárez con el número de subvención 4047565 y iii) la beca 4816394 de Estancia Posdoctoral por México concedida a Mariana Martínez-Castrejón en el marco del programa ProNacEs Agua-PRONAI «Fortalecimiento y coordinación de sujetos colectivos para la defensa y gestión del agua en el territorio». Así mismo, reconocen el trabajo de los revisores cuyas observaciones fortalecieron la versión original de este artículo.