

7. Innovaciones en simulación y evaluación de impacto para la gestión integrada de los recursos hídricos*

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL **

CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ ***

CRISTINA GARIBAY BAGNIS ****



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.07>

Resumen

El acceso a agua dulce es un desafío; la gestión integrada de los recursos hídricos es vital para abordar la sequía, el cambio climático y la degradación ambiental. Durante el período de 2021 a 2025, los estudios prominentes se definen, entre ellos las innovaciones con relación a las herramientas de simulación y evaluación del impacto de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). La simulación presenta modelos de escenarios cambiantes, opuestos a la evaluación del impacto que mide recompensas y fomenta la sostenibilidad de las políticas. Sin embargo, las brechas regionales persisten en términos socioculturales, de integración y de datos, además de ser mínimas, especialmente en regiones en vías de desarrollo. Aspectos emergentes identificados son el “riesgo climático” modelado, *big data* y métricas de sostenibilidad codificadas. La discusión ocurrió entre lo que es ser complejo o accesible, expertos en o frente a expertos, en términos de enfoque coac-

* Derivado del proyecto SIP 20240598: “Responsabilidad social empresarial y sostenibilidad en el abastecimiento de agua”.

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; correo electrónico: jasilva@ipn.mx

*** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

**** Doctora en Tecnología Avanzada. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4858-1110>

tual, de prioridades políticas frente a prioridades científicas. Este estudio demuestra la importancia de herramientas emergentes y la investigación interdisciplinaria y el seguimiento a largo plazo para la equidad y la GIRH resiliente del flujo de agua. La investigación a futuro debe abordar las deficiencias metodológicas, asegurando diversidad y el establecimiento de cuadros adaptados al entorno global donde se encuentren.

Palabras clave: *evaluación de impacto ambiental, gestión integrada de los recursos hídricos, modelación hidrológica, resiliencia hídrica.*

Introducción

La GIRH y el contexto ambiental más amplio han dejado de lado los enfoques sectoriales para adoptar enfoques integrados que reflejan las complejas interdependencias y los ciclos de retroalimentación entre estos sistemas hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos (Jain y Singh, 2023; Mishra et al., 2021). Este cambio es parte de una tendencia más amplia impulsada en parte por un creciente conjunto de pruebas de que las estrategias de gestión fragmentadas o monosectoriales no se abordan adecuadamente. La urgencia de encontrar soluciones holísticas ha aumentado en varias zonas del planeta (Siqueira-Gay et al., 2022; Diefenderfer et al., 2021).

De este modo, la simulación y la evaluación de impacto se convierten en estrategias invaluable para los tomadores de decisiones y las partes interesadas en tales. Mediante la simulación, se pueden analizar las interacciones entre múltiples sistemas (por ejemplo, el flujo de agua, la propagación de contaminantes, el uso de la tierra, etc.), se pueden simular y analizar en un entorno virtual (Ntona et al., 2022).

Por un lado, las herramientas de simulación proporcionan información sobre las condiciones futuras a través de bucles de retroalimentación dinámicos y pruebas de situaciones hipotéticas para guiar las decisiones sobre la distribución de recursos y fundamentar la política adaptativa (Ntona et al., 2022). Por otro lado, la evaluación de impacto es un procedimiento sistemático aplicado para evaluar los impactos posteriores, incluyendo social, económico y ambiental, de un plan de crecimiento en tiempo real o no.

Ambos enfoques proporcionan una descripción de los efectos a corto y largo plazo, fundamentan la política basada en la evidencia que optimiza el respeto a los derechos humanos (Abatan et al., 2024; Salahshoori et al., 2024).

A pesar de la importancia de los enfoques integrados, aún existen múltiples barreras, en primer lugar, las estrategias de gestión fragmentadas suelen ser una manifestación de compartimentos institucionales, en los que se asignan a diferentes dependencias con responsabilidades separadas para el suministro de agua, el uso de la tierra, el control de la contaminación, y conservación con poca superposición (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024). En segundo lugar, la colaboración limitada entre disciplinas y sectores obstaculiza el desarrollo de modelos verdaderamente integrados, lo que da como resultado análisis que descuidan los ángulos sociales o económicos relevantes (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024).

Por último, la disponibilidad y la calidad de los datos siguen siendo una limitación casi insoluble, ya que muchas regiones no cuentan con los conjuntos de datos de alta resolución necesarios para realizar simulaciones robustas o evaluaciones de impacto rigurosas (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024). Estos desafíos ponen de relieve la urgencia de aplicar enfoques innovadores e interdisciplinarios que incorporen perspectivas de múltiples partes interesadas y aborden condiciones futuras inciertas.

El objetivo principal de este artículo es analizar los estudios destacados que incluyen las innovaciones en el uso de herramientas de simulación y evaluación de impacto de la GIRH. Esta revisión pretende ilustrar las mejores prácticas y las nuevas tendencias en el área de herramientas de simulación a través de una amplia evaluación del diseño, la implementación y los resultados de las herramientas de simulación actualmente en uso. Se centra en las investigaciones publicadas entre 2021 y 2025, abarcando el enfoque debido a su reflexión actual de la investigación básica y avanzada sobre los activos hídricos incorporados. Este periodo abarca importantes desarrollos que se han producido junto con los avances tecnológicos, como los más avanzados herramientas de teledetección y marcos de políticas emergentes que enfatizan la sostenibilidad y la resiliencia.

Aunque los marcos de GIRH sean relevantes a nivel mundial, esta revisión será global en el sentido de que no se limitará a un contexto regional, abordando zonas secas, tierras costeras, o ríos, y abarcando tanto a los paí-

ses desarrollados como a los subdesarrollados (Smith et al., 2024; Jacob et al., 2024). Por lo tanto, no puede haber otra justificación para esta amplia comprensión, ya que las cuestiones de agua no respetan las fronteras políticas o geográficas y deben abordarse de forma específica a este nivel (Smith et al., 2024; Jacob et al., 2024).

El enfoque se centra en los estudios de regiones que enfrentan un estrés hídrico agudo, como partes de Asia, África y América Latina, donde los efectos de la variabilidad climática y la sobreextracción de recursos son particularmente manifiestos (Jacob et al., 2024; Smith et al., 2024). El análisis también cubrirá regiones con marcos de gobernanza ya establecidos (por ejemplo, en Europa y América del Norte) para mostrar las mejores prácticas y lecciones que se pueden transferir.

Después de esta introducción, se integra la sección de método, luego la sección del marco teórico, luego la revisión de hallazgos y finalmente las conclusiones.

Términos y conceptos clave

La GIRH se define generalmente como el desarrollo y la gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados con el fin de maximizar los beneficios económicos y sociales, considerando el bienestar sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Nagata et al., 2022). Uno de los elementos clave de la GIRH es la idea de que los diferentes desafíos de la gestión del agua (por ejemplo, la escasez de agua, la contaminación y el control de inundaciones) están interrelacionados y no se pueden resolver de manera efectiva, de forma aislada (Nagata et al., 2022). En esta misma línea, la GIRH como un sistema político y de planificación se centra en la planificación y las regulaciones que involucran la participación de las partes interesadas y la integración entre políticas y gobernanza adaptativa, que hace referencia a la necesidad de adaptar la gobernanza a la dinámica y las condiciones concretas de sus desafíos actuales y a la gestión orientada resultados y la revisión derivados de la adaptación (Nagata et al., 2022).

El modelado de simulación es una técnica de computadora que los investigadores utilizan para representar y analizar sistemas del mundo real,

de modo que ellos y los responsables de la toma de decisiones pueden hipotetizar escenarios y, al hacerlo, predecir cómo se comportarán los sistemas en escenarios hipotéticos bajo condiciones diversas (Ortiz-Partida et al., 2023). Respecto a la simulación en recursos hídricos los investigadores modelan variables hidrológicas, ecológicas, y socioeconómicas para capturar y describir los sistemas y dinámicas, incluida la propagación de contaminantes y la gestión de cantidades de agua en embalses, entre otras cosas (Ortiz-Partida et al., 2023). Los modelos van desde la física hidrológica, por ejemplo, el SWAT, WEAP y MODFLOW, hasta modelos basados en *big data*, aprendizaje automático e IA (Ortiz-Partida et al., 2023). La evaluación de impacto es un proceso sistemático que se realiza para intentar evaluar los impactos ambientales, sociales, y económicos que podrían causar los proyectos y propuestas basadas en políticas. Aunque no es una técnica en sí, sino una serie de ellas, la EIA, la EIS, y la EAE buscan hacer predicciones de lo que ocurrirá y basarse en ello para tomar ciertas decisiones (Moss et al., 2021).

Las evaluaciones de impacto ayudan a lograr esto al identificar posibles resultados adversos o beneficiosos y, por lo tanto, proporcionan una herramienta importante que puede utilizarse para evitar impactos adversos, maximizar los positivos y garantizar el cumplimiento de las normas y regulaciones de sostenibilidad y otros tipos (Moss et al., 2021).

Método

Búsqueda y selección de estrategia

Esta revisión se realizó de acuerdo con las pautas PRISMA 2020 con la intención de mantener la transparencia y el rigor durante todo el proceso de búsqueda y síntesis (Page et al., 2021). Además, se realizó una búsqueda bibliográfica sensible en 5 bases de datos electrónicas, incluidas Web of Science (WoS), Scopus, Google Scholar, Science Direct y EBSCO. Se eligieron estas bases de datos debido a su amplia cobertura de artículos de revistas revisadas por pares en campos relacionados con los recursos hídricos.

Para reflejar la naturaleza compleja de gestión integrada de los recursos hídricos, se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda: “recursos hídri-

cos”, “simulación” O “modelado”, “evaluación de impacto”; combinados utilizando el valor booleano (AND; OR) para garantizar que los estudios capturaran ambos aspectos de la simulación/modelado y la evaluación de impacto en relación con los contextos de gestión de los recursos hídricos.

La primera búsqueda abarcó desde 2021 a 2025. El límite inferior (2021) se seleccionó para reflejar un período importante en el que se aplican enfoques integrados y las herramientas de simulación avanzadas ganaron mayor atención. El límite superior (2025) captura nuevos estudios publicados desde 2023 y publicaciones esperadas de los materiales estudiados en línea.

La selección inicial se realizó a través de una revisión de títulos y resúmenes para garantizar la pertinencia de los estudios para los temas centrales (es decir, simulación, evaluación de impacto y gestión integrada de los recursos hídricos). Después esta etapa, se revisaron los registros duplicados e irrelevantes y se revisó el texto completo de los estudios que cumplieran explícitamente los criterios de inclusión. Además, se puntuaron los estudios en función de la claridad de las preguntas de investigación, idoneidad del diseño del estudio, validez de la medición y solidez del análisis de datos.

Marco teórico

Evolución de la gestión de los recursos hídricos

La gestión de los recursos hídricos fue históricamente basada en objetivos múltiples de un único propósito (para riego, control de inundaciones, energía hidroeléctrica, etc.), en consonancia con una perspectiva tecnocrática y de ingeniería (Zhao et al., 2022). Hasta mediados del siglo xx, las dependencias gubernamentales trabajaron principalmente en silos; se centraron en construir infraestructura física como represas, canales y tuberías para responder a las crecientes demandas sociales (Zhao et al., 2022). Esta filosofía desagregada a menudo ha descuidado las consideraciones ambientales y sociales más amplias, lo que ha dado lugar a la degradación ecológica y a intereses conflictivos entre las partes interesadas en numerosas cuencas fluviales a nivel mundial (Zhao et al., 2022).

Sin embargo, con el tiempo se ha ido tomando conciencia de los roles multidimensionales del agua que (como recurso natural esencial y un elemento fundamental para el desarrollo sostenible) condujo a un realineamiento hacia perspectivas integradoras (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024). Esto abrió la puerta para que el agua sea una forma de que los investigadores y los responsables de las políticas comprendan cómo el impacto de las decisiones (por ejemplo, en la agricultura) puede afectar involuntariamente a otro sector (por ejemplo, el suministro de agua municipal), lo que ha llevado a pedir que se establezcan marcos holísticos (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024).

A fines del siglo xx, los diálogos sobre políticas globales caracterizaron cada vez más al agua como un bien público que necesita una asignación equitativa, colaboración interdisciplinaria y gobernanza adaptativa (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024). Este nuevo enfoque allanó el camino para la GIRH, que proporcionó un paraguas conceptual general para reunir las dimensiones técnicas, ecológicas, económicas y sociopolíticas. Estas ideas han pasado a ser objeto de debate últimamente con algunos avances recientes, y por ejemplo, los modelos de cambio climático o la participación de las partes interesadas (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024) que consolidaron la resiliencia de estrategias sistémicas y prospectivas que cruzan los límites sectoriales tradicionales.

Hay hitos clave que influyen en la conversación global sobre la gestión integrada de los recursos hídricos:

1. *Principios de Dublín (1992)*. La Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente afirmó que el agua es un recurso limitado y frágil, básico para vida y en el medio ambiente y alentó la participación actualizada de las partes interesadas, incluidas las mujeres, en su gestión (Ofori y Mdee, 2022).
2. *Agenda 21 (1992)*. En la CNUMAD celebrada en Río de Janeiro, el Capítulo 18 abogó por el desarrollo sostenible de agua a través de la protección integradora de las dimensiones económicas, sociales y ambientales en su gestión (Saiu et al., 2022).
3. *Marco GWP*. Establecido en 1996, GWP adoptó un enfoque práctico para promover la GIRH a través de esfuerzos de desarrollo de capaci-

dades y estrategias participativas, en consonancia con Dublín y la Agenda 21 (Saiu et al., 2022).

4. *Directiva Marco del Agua de la UE (2000)*. Esta legislación supranacional tenía como objetivo el “buen estado ecológico” en todas las aguas europeas a través de planes de gestión de cuencas, lo que ilustra la promesa de los marcos integrados (Saiu et al., 2022).
5. *Agenda de Desarrollo Post-2015*. La integración de la gestión del agua se consolidó como un aspecto clave del desarrollo, cambiando el foco hacia la participación, la financiación innovadora y la tecnología con el lanzamiento de los ODS, en particular a través del ODS 6 (Saiu et al., 2022).

Pensamiento sistémico

Reconociendo que lo natural, lo social y lo económico están interrelacionados dinámicamente en múltiples escalas, el pensamiento sistémico en la GIRH promueve un análisis holístico de los desafíos relacionados con el agua (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023). En lugar de desglosar solo variables singulares (por ejemplo, suministro de agua, contaminación o agricultura), los modelos basados en sistemas de demanda ayudan a explorar los ciclos de retroalimentación y las interacciones no lineales que pueden tener un impacto desproporcionado en los resultados de la gestión (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023). Al tratar la cuenca hidrográfica o cuenca fluvial como una unidad a nivel de sistemas, las partes interesadas están mejor capacitadas para predecir el impacto intersectorial de intervenciones como la construcción de presas, la expansión agrícola o las reformas de políticas (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023).

Un beneficio esencial del pensamiento sistémico para la implementación de la GIRH es el potencial de los modelos integrados para fusionar diferentes conjuntos de datos, por ejemplo, combinando datos hidrológicos, socioeconómicos y ecológicos (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). Dichos modelos pueden utilizar diagramas de bucles causales y simulaciones de flujo de existencias para rastrear cómo un cambio en el precio del agua, por ejemplo, podría conducir a cambios en el comportamiento del consumidor,

lo que luego afectaría la producción agrícola y los servicios ecosistémicos (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). A medida que el cambio climático conduce a una mayor variabilidad e incertidumbre en la cantidad de agua disponible, el pensamiento sistémico proporciona un marco estructurado en el que considerar la gobernanza adaptativa y en el que los tomadores de decisiones pueden evaluar y revisar políticas a medida que se disponga de nueva información (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). La participación es un componente clave de los enfoques basados en sistemas, y los talleres de modelado participativo y los ciclos de retroalimentación integran iterativamente el conocimiento local (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023) y las consideraciones de equidad para modelar la configuración y los diálogos de políticas.

Sistemas adaptativos complejos

El paradigma de los sistemas adaptativos complejos (CAS) se suma a la perspectiva de sistemas al reconocer el comportamiento exploratorio activo en busca de supervivencia de varios agentes en la gestión del agua y el medio ambiente (Fei et al., 2021). En los CAS, los sistemas están compuestos por agentes interdependientes (individuos, comunidades, instituciones) cuyas interacciones crean comportamientos emergentes que son impredecibles al considerar los componentes de forma aislada. Los recursos son de naturaleza coevolutiva, aunque se modifican constantemente por las interacciones entre las intervenciones humanas y los procesos ambientales (Fei et al., 2021).

Dado que las políticas en CAS son iterativas y se utiliza la retroalimentación para adaptarlas al sistema (Wang et al., 2021), la adaptación es clave. Así, por ejemplo, una política de riego agrícola que agote las aguas subterráneas tendría que adaptarse iterativamente en función de los datos, la retroalimentación de actores, modelos actualizados, etc. Este enfoque apunta a la necesidad de flexibilidad y estructuras de gobernanza escalables capaces de adaptarse a dinámicas locales, nacionales y transfronterizas y, al mismo tiempo, evitar efectos contraproducentes en cascada (Wang et al., 2021).

Los Modelos Basados en Agentes (ABM) han simulado modelos heterogéneos, las respuestas de los actores (agricultores, industrias, reguladores) a las políticas o estímulos ambientales. Estas simulaciones muestran autoorganización como el surgimiento de cooperativas espontáneas en contextos institucionales débiles (Wang et al., 2021). Debido a que los modelos CAS son capaces de describir dinámicas no lineales y puntos de inflexión, pueden proporcionar alertas sobre eventos críticos que impactan desproporcionadamente en la calidad del agua o su disponibilidad (Wang et al., 2021).

El pensamiento sistémico y el CAS, a su vez, constituyen la base para una educación integrada y gestión adaptativa y fomentar paradigmas cíclicos y participativos característicos de la compleja asignación de recursos hídricos, la salud de los ecosistemas y la participación de las partes interesadas (Blasi et al., 2022). Estos enfoques sustentan el análisis de metodologías de simulación y evaluación de impacto para abordar la complejidad fundamental de los sistemas hídricos (Blasi et al., 2022).

Principales estudiosos y escuelas de pensamiento

La génesis de la GIRH y la EIA se remonta al trabajo fundacional de los primeros académicos (Di Vaio et al., 2021). La multidimensionalidad de Asit K. Biswas destaca la gestión del agua y su dimensión sociopolítica, y Malin Falkenmark introdujo los “índices de estrés hídrico” para promover un enfoque integrado de los factores ecológicos, económicos y sociales (Di Vaio et al., 2021). Loucks y Van Beek, por su parte, Riki Therivel y Robert K. Morgan crearon herramientas matemáticas para la planificación hidrológica. Fueron pioneros en la integración de consideraciones ambientales en las primeras etapas de la planificación de proyectos en su trabajo sobre EIA, teniendo una gran influencia en las evaluaciones ambientales estratégicas y su expansión para abarcar elementos sociales y económicos (Di Vaio et al., 2021).

Claudia Pahl-Wostl ha coadyubado al desarrollo de modelos de gobernanza del agua ajustados a los sistemas y resiliencia al cambio climático. Cecilia Tortajada ha enriquecido la comprensión de la seguridad hídrica y las políticas de gestión transfronteriza, trabajando en conjunto con organi-

zaciones internacionales (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021; Hariram et al., 2023). Genevieve Connors, por otro lado, ha estado interesada en métodos innovadores de investigación participativa y conocimiento indígena para la evaluación de impacto ambiental (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021). A su vez, X. Chen ha adaptado modelos basados en agentes a proyectos de evaluación socioecológica (Hariram et al., 2023). Los nuevos esfuerzos recientes en GIRH y EIA reflejan la necesidad de diversidad y la urgencia de enfoques adaptativos, equitativos y basados en la evidencia (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021; Hariram et al., 2023).

Debates y controversias

Primero, la nueva polémica en la GIRH. Este equilibrio cuestiona la necesidad de enfoques holísticos para comprender los sistemas hídricos y sugiere que se necesita una especialización para la toma de decisiones informadas y basadas en la evidencia (Di Vaio et al., 2021; Obaideen et al., 2022). En segundo lugar, los dos segmentos discuten a quienes prefieren los modelos de efecto relevante, pero simplicistas, como asistidos por computadora, y quien defiende la simulación más profunda, con recursos limitados, simulaciones útiles para la autoasistencia o el contexto de asistencia limitada. Mientras que los buenos modelos simples aumentan la participación de las partes interesadas y la transparencia, los modelos simples son demasiado simplificados, lo que resulta en un final entre sofisticación y practicidad (Di Vaio et al., 2021; Wang et al., 2021).

En tercer lugar, el debate sobre la política científica individual: los enfoques basados en políticas son prácticos y contextuales, mientras que los enfoques científicos son innovadores y pertinentes (Di Vaio et al., 2021; Wang et al., 2021). A su vez, se está discutiendo la preferencia de investigación de políticas de corto plazo o la independencia científica a largo plazo. Lo anterior sugiere un enfoque híbrido preferido por la combinación de experiencia científica y transcendencia social para equilibrar la independencia y la relevancia (Kamyab et al., 2023; Velásquez, 2021). En total, estos debates resaltan la naturaleza multifacética de la GIRH y los marcos de go-

bierno deberán unir el conocimiento técnico con la practicidad y la relevancia social para gestionar el agua de forma resiliente y sostenible.

Principales hallazgos

Resultados de la evaluación de impacto

Uno de los aspectos de impacto que se considerarán más ampliamente con respecto a GIRH o el MED es el análisis de la respuesta ambiental. Los registros de los indicadores de calidad de agua, actividades de restauración de hábitat o dinámica de biodiversidad (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023). Se ha demostrado de manera efectiva, a partir de la implementación de modelos de caudal ecológico, que han existido mejoras en la calidad del hábitat del agua y la diversidad de especies, planes de extracción de agua en los que se incluyeron liberaciones adaptativas para cumplir con los caudales mínimos (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Las técnicas de teledetección de alto rendimiento han permitido una mejor detección de los cambios en la cobertura terrestre y han ilustrado cómo la reforestación de cuencas hidrográficas o el establecimiento de zonas de amortiguación pueden producir ganancias a largo plazo en la salud de los arroyos y la retención de nutrientes (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Estudios recientes también están haciendo hincapié en los modelos de dispersión, que caracterizan el destino de los contaminantes bajo diferentes condiciones de gestión (Di Vaio et al., 2021). Estas evaluaciones han demostrado reducciones en las cargas de fósforo y sedimentos dentro de las aguas receptoras cuando se implementan las mejores prácticas de gestión (BMP) específicas, incluidos los humedales construidos en los planes agrícolas o de cuencas hidrográficas (Di Vaio et al., 2021). En conjunto, estos resultados demuestran el potencial de las intervenciones integradas y basadas en evidencia para abordar los patrones de degradación ecológica y mejorar la resiliencia de los ecosistemas (Di Vaio et al., 2021).

Por lo tanto, los resultados socioeconómicos son un elemento clave de las evaluaciones de impacto dentro de la GIRH, con indicadores de resilien-

cia comunitaria y satisfacción de las partes interesadas y la viabilidad económica es particularmente importante (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021). Varios estudios han demostrado que la gestión participativa del riego, incluido el acceso equitativo al agua, conduce a una mayor producción agrícola y, por lo tanto, a una mejora de los medios de vida de las comunidades rurales (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021). Además, se han empleado algunos enfoques (por ejemplo, el análisis de decisiones de múltiples criterios (MCDA) para evaluar la relación coste-eficacia del agua e infraestructura de tratamiento, lo que demuestra que la participación de las partes interesadas locales puede aumentar sustancialmente la aceptación del proyecto y la sostenibilidad a largo plazo (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021).

Una tendencia complementaria es la inclusión de Evaluaciones de Impacto Social (EIS) con evaluaciones ambientales, en las que se recogen dimensiones cualitativas como los valores culturales, los conocimientos tradicionales y los impactos de género (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Se ha demostrado que los procesos de planificación inclusivos, mediante los cuales los miembros de la comunidad son cocreadores de estrategias de gestión, aumentan la cohesión social y desarrollan capacidades de adaptación de las poblaciones vulnerables (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023).

Estos hallazgos han tenido importantes implicaciones políticas, orientando los marcos regulatorios y las estructuras de gobernanza (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021). Como las evaluaciones de impacto que muestran los ahorros a largo plazo de la infraestructura verde, han llevado a algunos municipios a implementar nuevas normas de gestión de aguas pluviales. En las cuencas fluviales transfronterizas con conflictos en curso sobre la asignación de recursos, se ha informado que las evaluaciones de impacto con base científica facilitan las negociaciones que dan como resultado el establecimiento de organizaciones de cuencas fluviales y acuerdos de gestión conjunta (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021). Cada vez hay más pruebas que destacan la importancia de realizar una evaluación de impacto exhaustiva en la formulación de políticas para garantizar que la evidencia se refleje en los marcos nacionales e internacionales de gobernanza del agua (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021).

Estudios comparativos

Múltiples estudios de caso —de regiones tan diversas como el Sudeste Asiático, el África subsahariana y Sudamérica— han identificado factores críticos de éxito y obstáculos para la implementación eficaz de la GIRH. Por ejemplo, en situaciones áridas y semiáridas, la asignación adaptativa es el principal factor de éxito, es decir, distribución justa de recursos hídricos limitados (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Por otro lado, las zonas costeras enfrentan problemas como la intrusión de agua salada y el aumento del nivel del mar, y las evaluaciones integradas indican la restauración de manglares y las zonas de amortiguamiento costeras como estrategias de mitigación eficientes (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Sin embargo, en todas las regiones, la fragmentación de las instituciones que separan la supervisión de varios sectores de la gestión del agua con poca (o ninguna) coordinación (Di Vaio et al., 2021; Sahoo y Goswami, 2024) surge como una barrera común.

Los análisis multimodo indican que los modelos hidrológicos en combinación con submodelos socioeconómicos o ecológicos suelen producir evaluaciones de impacto más sólidas que los estudios de un sólo método (Di Vaio et al., 2021; Hariram et al., 2023). Mediante la integración del análisis de decisiones de múltiples criterios (MCDA) junto con la información geográfica. Por ejemplo, con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los investigadores pueden ahora explorar los cambios en el uso de la tierra, la disponibilidad de agua y los servicios ecosistémicos a una escala más definida. Sin embargo, estos enfoques de modelado integrados pueden requerir una gran cantidad de datos y ser técnicamente sofisticados, por lo que surge la necesidad de desarrollar capacidades y conocimientos especializados intersectoriales para optimizar las oportunidades de éxito (Di Vaio et al., 2021; Hariram et al., 2023).

Resultados contradictorios

Existe un amplio consenso sobre los beneficios de evaluaciones de impacto basadas en simulaciones, pero las diferencias entre sus proponentes surgen por muchas razones:

1. *Diferencias en la escala del modelo*: pueden ocurrir resultados inconsistentes en escalas espaciales diádicas y escalas temporales; por ejemplo, un modelo centrado en los impulsores y la dinámica de las cuencas puede descuidar las interacciones entre cuencas a nivel de microcuenca (Sigalla et al., 2021).
2. *Calidad de los datos*: en muchas regiones, especialmente en el sur global, el monitoreo limitado conduce a una fuerte dependencia de datos secundarios o satélites de escala gruesa, imágenes que aportan incertidumbres a los resultados del modelo (Sigalla et al., 2021).
3. *Participación insuficiente de las partes interesadas*: la investigación sin una participación adecuada de las partes interesadas puede sesgar las necesidades locales y comunitarias, prioridades que resultan en contradicciones o inexactitudes en los hallazgos (Sigalla et al., 2021).

Los investigadores abogan por protocolos estandarizados (por ejemplo, la adopción de formatos de datos uniformes, puntos de referencia de calibración y métricas de validación) para permitir comparaciones entre modelos y regiones (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Además, la incertidumbre se puede reducir mediante el uso de métodos de conjunto o validación cruzada con múltiples modelos, lo que da como resultado una amplia distribución sobre posibles conciliaciones de las perspectivas de las partes interesadas, también es eficaz a través de talleres de modelado participativo, que ayuda a garantizar que se cumplan los supuestos del modelo (por ejemplo, los valores de los parámetros (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021).

Tendencias emergentes

Una de las principales tendencias emergentes en la GIRH es el enfoque sistemático para considerar escenarios de cambio climático al planificar y tomar decisiones (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Los investigadores están empezando a utilizar modelos climáticos globales (GCM) a escala reducida, proyecciones hidroclimáticas y análisis de escenarios para comprender mejor cómo es probable que el aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y los fenómenos meteorológicos extremos

afecten el funcionamiento de las cuencas hidrográficas y la disponibilidad de recursos (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Al reunir los componentes del sistema de suministro de agua, estos modelos integradores ayudan a los tomadores de decisiones a diseñar respuestas adaptativas y proactivas, por ejemplo, actualizando los criterios de operación de los embalses o utilizando planes de contingencia para sequías (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021).

Mientras, los modelos de riesgo climático están ganando terreno y hay importantes deliberaciones sobre las incertidumbres que implican las proyecciones a largo plazo; sin embargo, los modelos climáticos pueden producir una amplia gama de resultados o incluso resultados contradictorios, en particular cuando se reducen a escala local o regional, debido a diferencias en los datos de entrada, los supuestos y técnicas computacionales utilizadas (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021). Los críticos dicen que tener que depender demasiado de proyecciones erróneas puede llevar a inversiones desalineadas o ineficientes en términos de costos en infraestructura y políticas; otros sostienen que, al menos (si) las incertidumbres siguen siendo altas, es mejor protegerse contra los escenarios climáticos que dejarlos de lado en los planes de gestión en su conjunto, ya que los enfoques de “sin arrepentimiento” o de “bajo arrepentimiento” pueden generar beneficios de resiliencia en una gama más amplia de posibles climas futuros (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021).

Por lo tanto, una controversia central se refiere a encontrar un equilibrio entre un modelo climático riguroso, pero prescriptivo y enfoques de gestión flexibles e iterativos que se adaptan a los datos emergentes y las condiciones cambiantes (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021).

Modelo participativo de las partes interesadas

Una tendencia complementaria, ampliamente considerada como una segunda tendencia importante, es el surgimiento de enfoques participativos que involucren a las comunidades locales, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y los encargados de formular políticas en la creación conjunta de modelos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones (Di Vaio et al.,

2021; Scanlon et al., 2023). Esta voluntad de trabajar juntos demuestra la comprensión de que es necesario ir más allá del enfoque puramente técnico y científico adoptado en la primera agenda mundial del agua y tener en cuenta el contexto político, social y cultural matizado a través del cual se desarrolla la gestión del agua (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023). Las investigaciones muestran que los procesos de modelización participativa (por ejemplo, talleres de escenarios, diálogos entre múltiples partes interesadas) pueden mejorar la calidad de los datos o la confianza y aceptación en soluciones propuestas (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Aunque la participación de las partes interesadas ha sido aclamada como un mecanismo para aumentar la legitimidad y la equidad en el proceso de toma de decisiones. Con respecto a la gestión del agua, aún existen desafíos para garantizar la incorporación significativa de modelado impulsado por expertos junto con el conocimiento local o indígena (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021). Los detractores de los enfoques participativos a gran escala argumentan que estos procesos requieren mucha mano de obra. Los modelos desarrollados utilizando sólo información de expertos, a menudo carecen de conocimientos específicos del sitio que permitan una gestión eficiente porque las estrategias no se ajustan a las realidades del sitio de uso (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021). El término medio son los enfoques híbridos que combinan modelos hidrológicos o ecológicos especializados con procesos estructurados para la retroalimentación de las partes interesadas locales, mejorando la precisión técnica y la relevancia comunitaria (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021).

Innovaciones tecnológicas

Una tendencia reciente es la explosión de avances tecnológicos utilizados para recopilar, analizar y compartir datos sobre el agua, análisis de *big data*, utilizar grandes conjuntos de datos (recopilados desde satélites de teledetección hasta sensores de internet de las cosas [IoT]) para permitir el monitoreo casi en tiempo real de parámetros relacionados con el flujo y la calidad del agua y los cambios en el uso de la tierra (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021). Las soluciones en la nube y los DSS pueden

respaldar integración rápida de diversos datos para permitir la prueba de escenarios y el desarrollo adecuado de políticas por parte de partes interesadas dispersas (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021). Hoy en día, muchos municipios y dependencias de agua utilizan la detección de anomalías impulsada por IA como un sistema de alerta temprana contra el riesgo de inundaciones o fallas de infraestructura (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021).

Aparte de estos avances, los problemas relacionados con el acceso equitativo y la privacidad de los datos siguen siendo un tema candente de vanguardia. Estas herramientas de vanguardia suelen exigir una infraestructura de internet sofisticada, computación de alto rendimiento y conocimientos especializados, ninguno de los cuales está igualmente disponible en las regiones (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021). La baja capacidad financiera e institucional en los contextos en desarrollo puede impedir la adopción de tecnologías avanzadas, lo que exacerba la brecha digital en la gestión del agua. Además, la necesidad de recopilar información sensible, incluidos los niveles de agua subterránea o los patrones de uso del agua, plantea inquietudes sobre la privacidad y la propiedad de los datos, lo que genera debates sobre la mejor manera de establecer protocolos de intercambio de datos transparentes y seguros (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021). Por lo tanto, el desafío es cómo ampliar las innovaciones tecnológicas de una manera que sea apropiada a las limitaciones locales, preserve la privacidad y mejore la capacidad técnica de las partes interesadas en regiones con escasez de datos (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021).

Métricas de sostenibilidad y resiliencia

Una tercera tendencia creciente es el uso de la sostenibilidad multidimensional y métricas de resiliencia para informar el desempeño del sistema hídrico (Saikia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021). Para explicar no sólo la integridad ecológica, sino también el bienestar social, la vitalidad económica y la fortaleza institucional, los investigadores están involucrados en el diseño de índices de investigación (o compuestos) como puntuaciones de vulnerabilidad, cuadros de indicadores de resiliencia o índices de sostenibilidad del agua (Saikia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021). Estas métricas

tienen por objeto proporcionar evaluaciones holísticas y pertinentes para las políticas de las condiciones de los recursos hídricos y los resultados de la gestión para informar sobre estrategias adaptativas y de largo plazo. (Sai-
kia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021).

Una pregunta central de es si estas métricas en expansión deberían estandarizarse en regiones geográficas y culturalmente distintas y cómo hacerlo. Otros afirman que es necesario que sean universales. Se necesitan criterios que permitan un análisis y una evaluación comparativos globales (por ejemplo, centrar los resultados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Syed, 2024; Krishnan et al., 2022; Slaimi, 2024). No obstante, múltiples críticos explican que los factores contextuales (como los sistemas tradicionales de derechos de agua, las prácticas indígenas y las características ecoecológicas únicas) hacen que una única métrica del agua sea potencialmente engañosa.

En virtud de esto, existe un movimiento hacia una métrica flexible: sistemas métricos que mantienen los indicadores globales fundamentales, pero permiten la adaptación local, garantizando al mismo tiempo que las complejidades socioecológicas estén representadas en las decisiones de gestión (Syed, 2024; Krishnan et al., 2022; Slaimi, 2024).

Conclusión

La síntesis de la simulación con la evaluación de impacto sirve como piedra angular en la GIRH, lo que, a su vez, mejora la comprensión multidimensional de los sistemas socioecológicos complejos. El análisis de escenarios con modelos de simulación, adaptados a la asignación de agua o a los parámetros socioeconómicos, puede ayudar a predecir cómo el desempeño del sistema puede variar con el cambio de las condiciones de entrada. Mientras tanto, en paralelo, las evaluaciones de impacto (por ejemplo, evaluaciones de impacto ambiental, evaluaciones ambientales estratégicas) son marcos estratégicos a través de los cuales los responsables de las políticas se guían por identificar las compensaciones y garantizar que se alcancen los objetivos de sostenibilidad. Estas dos herramientas se complementan entre sí reflejando

la visión cuantitativa y cualitativa del marco de toma de decisiones basado en evidencia.

Dentro de los antecedentes de los temas tratados, en primer lugar, se destaca la importancia de la colaboración multidisciplinaria, en segundo lugar, los participantes destacaron con frecuencia la importancia de la gestión del agua para las políticas, en la que hidrólogos, ecologistas, científicos sociales y responsables de la formulación de políticas aportaron información sobre los enfoques para la gestión del agua. En tercer lugar, se ha fomentado la participación de las partes interesadas, especialmente en los debates sobre la adaptación al cambio climático, la gobernanza de las aguas transfronterizas y la distribución equitativa de los recursos. Se considera un desafío y una oportunidad para mejorar la legitimidad y la eficacia de las decisiones de gestión del agua. Estos temas, que destacan la interconexión de la gestión del agua y el medio ambiente en la actualidad, apuntan a la necesidad de adaptación y compromiso entre los sectores interconectados. escalas de gobernanza.

Sin embargo, aunque el pensamiento es sistémico y complejo, los sistemas adaptativos brindan un buen marco conceptual básico, pero existen lagunas teóricas notables en las que los paradigmas tradicionales y los paradigmas emergentes aún no han convergido por completo. La literatura, por ejemplo, señala la necesidad de marcos conceptuales interdisciplinarios que integren mejor las dimensiones socioculturales en los sistemas hidrológicos o ecológicos. Además, consideraciones de equidad y justicia (es decir, cómo las decisiones sobre quién debe recibir recursos impactan a los marginados) también suelen ser no discutidos.

Metodológicamente, el desafío es la limitación de los datos y la complejidad de los modelos. Aunque estos modelos altamente sofisticados tienen información muy detallada, muchas veces no es de fácil acceso debido a la cantidad de conjuntos de datos que se requieren y los recursos computacionales necesarios, especialmente en entornos con escasez de datos. Además, muchas evaluaciones de impacto aún utilizan métodos o índices cualitativos obsoletos, lo que requiere una herramienta que combine información cuantitativa y cualitativa que refleje cambios dinámicos y espacialmente explícitos en los sistemas socioecológicos.

Geográficamente, la cobertura de la investigación es irregular, con estudios de casos que se inclinan hacia el mundo desarrollado y la falta de un análisis profundo del África subsahariana o de partes del sur de Asia y América Latina. De hecho, las comunidades marginadas (por ejemplo, asentamientos informales y grupos indígenas) suelen estar menos representadas tanto en los estudios de modelización como en las medidas de evaluación. El desequilibrio demográfico otorga una ventaja comparativa a la investigación global y dificulta que una investigación más localizada y contextualizada informe el contexto y las vulnerabilidades locales.

Para llenar los vacíos existentes en la metodología, es necesario que los investigadores miren hacia la IA y el ML en simulaciones predictivas. Estas técnicas avanzadas no sólo pueden mejorar el reconocimiento de patrones de alta resolución y las pruebas de escenarios, sino que también pueden ayudar significativamente a abordar la cuantificación de la incertidumbre, especialmente cuando se integra con datos de teledetección y sistemas de monitoreo basados en IoT.

Los sistemas de recursos hídricos son complejos y multidisciplinarios y requieren conocimientos de ingeniería y ecología, la economía, así como las ciencias sociales y los estudios de políticas, pueden fomentar la innovación y la investigación holística mediante consorcios de investigación y redes transdisciplinarias y garantizar que las dimensiones técnicas y humanas se aborden de manera proporcional, lo que es clave para desarrollar soluciones escalables y equitativas es una mejor comunicación y coproducción de conocimiento entre actores académicos, gubernamentales y comunitarios.

En la literatura actual se han publicado estudios longitudinales que siguen los cambios a largo plazo en la salud de las cuencas hidrográficas, el progreso socioeconómico y la gobernanza. En las próximas décadas, la eficacia proporcionaría una mejor comprensión de los impactos acumulativos y capacidades de adaptación. Esa investigación podría hacer uso de conjuntos de datos históricos y análisis geoespaciales para analizar la inflexión en las curvas para la disponibilidad de agua, la dinámica demográfica y la variabilidad climática.

Por último, la investigación más profunda en la integración de políticas es holística. En concreto, la investigación sobre instrumentos de política

efectiva, ajustes institucionales y sistemas de incentivos podría vislumbrar sobre la forma de abordar la integración de enfoques de mejores prácticas en la gobernanza a diferentes niveles. La investigación sobre la implicación de las partes interesadas, por ejemplo, es necesaria para implementar enfoques de mejores prácticas para la inclusión en la toma de decisiones, así como en la adopción de enfoques inclusivos y responsivos para comprometer a las comunidades locales. En conjunto, esta revisión de la literatura ha destacado la necesidad de una gestión integrada del agua y el medio ambiente para abordar problemas multifacéticos que difieren en alcance desde la variabilidad climática y la escasez de agua hasta la degradación de los ecosistemas.

Al reunir conocimientos adquiridos de la simulación y las prácticas de evaluación de impacto, la revisión abarca tendencias emergentes, debates en curso y lagunas críticas. Para informar sobre el mapa de posibilidades de investigación. En el futuro, los responsables de políticas, investigadores y profesionales deberían abogar por enfoques innovadores integrados basados en modelos, colaboración interdisciplinaria y participación inclusiva de las partes interesadas para promover resultados equitativos y sostenibles. Este esfuerzo exige compromisos concretos con el desarrollo de capacidad, gobernanza transparente de los datos y vigilancia a largo plazo para asegurarse de que las futuras políticas y programas sean adaptables, resilientes y aborden desafíos del agua y medio ambiente dinámicos.

Referencias

- Adom, A., Obaigbena, A., Ugwuanyi, E. D., Jacks, B. S., Umoga, U. J., Daraojimba, O. H. y Lottu, O. A. (2024). Integrated simulation frameworks for assessing the environmental impact of chemical pollutants in aquatic systems. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 543-554. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.831>
- Adom, R. K. y Simatele, M. D. (2024). Overcoming systemic and institutional challenges in policy implementation in South Africa's water sector. *Sustainable Water Resources Management*, 10, 69. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01040-3>
- Aivazidou, E., Banias, G., Lampridi, M., Vasileiadis, G., Anagnostis, A., Papageorgiou, E. y Bochtis, D. (2021). Smart technologies for sustainable water management: An urban analysis. *Sustainability*, 13(24), 13940. <https://doi.org/10.3390/su132413940>
- Azhoni, A., Holman, I. y Jude, S. (2024). Climate change adaptation attributes across

- scales and inter-institutional networks: Insights from national and state-level water management institutions in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(6), 57. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10156-y>
- Blasi, S., Ganzaroli, A. y De Noni, I. (2022). Smartening sustainable development in cities: Strengthening the theoretical linkage between smart cities and SDGs. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103793>
- Dai, J. y Azhar, A. (2024). Collaborative governance in disaster management and sustainable development. *Public Administration and Development*, 44(4), 358-380. <https://doi.org/10.1002/pad.2071>
- Diefenderfer, H. L., Steyer, G. D., Harwell, M. C., LoSchiavo, A. J., Neckles, H. A., Burdick, D. M., ... y Twilley, R. R. (2021). Applying cumulative effects to strategically advance large-scale ecosystem restoration. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(2), 108-117. <https://doi.org/10.1002/fee.2274>
- Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G. y Palladino, R. (2021). Water governance models for meeting sustainable development goals: A structured literature review. *Utilities Policy*, 72, 101255. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255>
- Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J. A., Ahmed, V., Chen, C. y Lok, K. L. (2021). The critical role of the construction industry in achieving the sustainable development goals (SDG): Delivering projects for the common good. *Sustainability*, 13(16), 9112. <https://doi.org/10.3390/su13169112>
- Hairam, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V. y Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682. <https://doi.org/10.3390/su151310682>
- Ishaque, W., Mukhtar, M. y Tanvir, R. (2023). Pakistan's water resource management: Ensuring water security for sustainable development. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1096747. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1096747>
- Jacob, D. E., Nelson, I. U. y Izah, S. C. (2024). Indigenous water management strategies in the Global South. En *Water crises and sustainable management in the Global South* (pp. 487-525). Springer Nature Singapore.
- Jain, S. K. y Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Elsevier.
- Kaiser, R. A., Taing, L. y Bhatia, H. (2022). Antimicrobial resistance and environmental health: A water stewardship framework for global and national action. *Antibiotics*, 11(1), 63. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010063>
- Kamyab, H., Khademi, T., Chelliapan, S., Saberi Kamarposhti, M., Rezanian, S., Yusuf, M. y Ahn, Y. (2023). The latest innovative avenues for the utilization of artificial intelligence and big data analytics in water resource management. *Results in Engineering*, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101566>
- Kouhizadeh, M., Saberi, S. y Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
- Krishnan, S. R., Nallakuruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasi-

- vam, J. y Sethuraman, S. (2022). Smart water resource management using artificial intelligence: A review. *Sustainability*, 14(20), 13384. <https://doi.org/10.3390/su142013384>
- Li, M., Cao, X., Liu, D., Fu, Q., Li, T. y Shang, R. (2022). Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach. *Agricultural Water Management*, 259, 107235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107235>
- Malik, S., Chadhar, M., Vatanasakdakul, S. y Chetty, M. (2021). Factors affecting the organizational adoption of blockchain technology: Extending the technology-organization-environment (TOE) framework in the Australian context. *Sustainability*, 13(16), 9404. <https://doi.org/10.3390/su13169404>
- Marqués, A. C., Veras, C. E. y Rodríguez, D. A. (2022). Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 608, 127690. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690>
- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. y Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
- Moss, E., Watkins, E. A., Singh, R., Elish, M. C. y Metcalf, J. (2021). Assembling accountability: *Algorithmic impact assessment for the public interest*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3877437>
- Nagata, K., Shoji, I., Arima, T., Otsuka, T., Kato, K., Matsubayashi, M. y Omura, M. (2022). Practicality of integrated water resources management (IWRM) in different contexts. *International Journal of Water Resources Development*, 38(5), 897-919. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1921709>
- Ntona, M. M., Busico, G., Mastrocicco, M. y Kazakis, N. (2022). Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of the Total Environment*, 846, 157355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S. y Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving Sustainable Development Goals (SDG) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Ofori, A. D. y Mdee, A. (2022). Integrated water resource management. En W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia y T. Wall (Eds.), *Clean water and sanitation: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95846-0_4
- Ortiz-Partida, J. P., Fernández-Bou, A. S., Maskey, M., Rodríguez-Flores, J. M., Medellín-Azuara, J., Sandoval-Solis, S. y Kahil, T. (2023). Hydro-economic modeling of water resources management challenges: Current applications and future directions. *Water Economics and Policy*, 9(01), e2340003. <https://doi.org/10.1142/S2382624X23400039>
- Poulin, C. y Kane, M. B. (2021). Infrastructure resilience curves: Performance measures

- and summary metrics. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107926. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107926>
- Sahoo, S. y Goswami, S. (2024). Theoretical framework for assessing the economic and environmental impact of water pollution: A detailed study on sustainable development of India. *Journal of Future Sustainability*, 4(1), 23-34. <https://doi.org/10.5267/j.jfs.2024.1.003>
- Saiu, V., Blečić, I. y Meloni, I. (2022). Making sustainability development goals (SDG) operational at suburban level: Potentials and limitations of neighbourhood sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106845. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106845>
- Saikia, P., Beane, G., Garriga, R. G., Avello, P., Ellis, L., Fisher, S. y Jiménez, A. (2022). City water resilience framework: A governance-based planning tool to enhance urban water resilience. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103497>
- Salahshoori, I., Wang, Q., Nobre, M. A., Mohammadi, A. H., Dawi, E. A. y Khonakdar y H. A. (2024). Molecular simulation-based insights into dye pollutant adsorption: A perspective review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103281. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103281>
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., ... y Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87-101. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00418-9>
- Sigalla, O. Z., Tumbo, M. y Joseph, J. (2021). Multi-stakeholder platform in water resources management: A critical analysis of stakeholders' participation for sustainable water resources. *Sustainability*, 13(16), 9260. <https://doi.org/10.3390/su13169260>
- Siqueira-Gay, J., Metzger, J. P., Sánchez, L. E. y Sonter, L. J. (2022). Strategic planning to mitigate mining impacts on protected areas in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 5(10), 853-860. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00921-9>
- Slaimi, A. (2024). *A meta-learning approach for hydrological time series model selection* [disertación doctoral]. Dublin City University. <https://doras.dcu.ie/30253/>
- Smith, M. D., Sikka, A., Taguta, C., Dirwai, T. L. y Mabhaudhi, T. (2024). Embracing complexities in agricultural water management through nexus planning. *Irrigation and Drainage*, 73(5), 1695-1716. <https://doi.org/10.1002/ird.3041>
- Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S. y Sillanpää, M. (2021). Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576-41595. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14332-4>
- Syed, T. (2024). *Reframing scale issues in transboundary water governance scale-descale-rescale analysis of policy design and implementation* [disertación doctoral]. Tufts University. <https://www.proquest.com/openview/57228fe8fcdde0a9b15c5cfa6ae-1768c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Velásquez, L. S. (2021). Agenda 21: A form of joint environmental management in

- Manizales, Colombia. En *The earthscan reader in sustainable cities* (pp. 293-320). Routledge.
- Vo, K., Sarkar, M., White, P. J. y Yuriev, E. (2025). Metacognitive problem solving: Exploration of students' perspectives through the lens of multi-dimensional engagement. *Chemistry Education Research and Practice*, (26), 141-157. <https://doi.org/10.1039/d4rp00096j>
- Wang, X. C., Jiang, P. yang, L., Van Fan, Y., Klemeš, J. J. y Wang, Y. (2021). Extended water-energy nexus contribution to environmentally related sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111485>
- Yap, J. y McLellan, B. (2024). Exploring transitions to a hydrogen economy: Quantitative insights from an expert survey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.213>
- Zhao, Y., Price, M. y Trowsdale, S. (2022). Comparison of the transition to more sustainable stormwater management in China and the USA. *Water*, 14(12), 1960. <https://doi.org/10.3390/w14121960>