

Artículo Revisión

Gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas

Efficient water management in agricultural systems

José Luis Zúñiga Pincay^{1*}  

¹Universidad Agraria del Ecuador, Milagro - Ecuador

*Autor de correspondencia: José Luis Zúñiga Pincay 

Recibido: 01-07-2023

Revisado: 08-07-2023

Aceptado: 15-07-2023

Publicado: 29-07-2023

Cómo citar este artículo: Zúñiga Pincay, J. L. (2023). Gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas. *Viterra*, 1(2), 1-30. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/5>

RESUMEN

La gestión eficiente del agua constituye uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas debido al incremento de la demanda de alimentos, la creciente escasez de los recursos hídricos y los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad y distribución del agua. En este contexto, la optimización del uso del agua de riego ha evolucionado desde enfoques centrados exclusivamente en la eficiencia hidráulica hacia modelos integrales que incorporan criterios de productividad hídrica, sostenibilidad ambiental, innovación tecnológica y resiliencia agrícola. El objetivo de esta revisión bibliográfica fue analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre la gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas, considerando la evolución conceptual de la eficiencia del uso del agua, los principales indicadores de desempeño, las tecnologías emergentes para la optimización del riego, las estrategias de adaptación frente al cambio climático y las perspectivas futuras para una agricultura sostenible. Para ello, se realizó una revisión de literatura científica mediante la consulta de artículos indexados, libros especializados y documentos técnicos publicados por organismos internacionales relacionados con la gestión del agua en la agricultura. La información recopilada fue organizada en categorías temáticas y analizada de forma comparativa para identificar tendencias, avances y desafíos actuales. La evidencia revisada demuestra que la integración de sistemas de riego presurizado, sensores, teledetección, agricultura de precisión, inteligencia artificial y estrategias de reutilización del agua ha mejorado significativamente la eficiencia en el uso del recurso hídrico. Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la variabilidad climática, la infraestructura de riego, los costos de implementación y la transferencia tecnológica. Se concluye que la gestión eficiente del agua requiere enfoques multidisciplinarios que integren innovación tecnológica, manejo sostenible de los recursos hídricos y políticas orientadas a fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos ambientales actuales.

Palabras clave: agricultura sostenible; eficiencia del agua; gestión del agua; productividad hídrica; riego de precisión.

ABSTRACT

Efficient water management is one of the main challenges for the sustainability of agricultural systems due to the increasing demand for food, the growing scarcity of water resources, and the impacts of climate change on water availability and distribution. In this context, the optimisation of irrigation water use has evolved from approaches focused exclusively on hydraulic efficiency to integrated models that incorporate water productivity, environmental sustainability, technological innovation, and agricultural resilience. The objective of this bibliographic review was to critically analyse the available scientific evidence on efficient water management in agricultural systems, considering the conceptual evolution of water use efficiency, the main performance indicators, emerging technologies for irrigation optimisation, adaptation strategies to climate change, and future perspectives for sustainable agriculture. To achieve this, a review of scientific literature was conducted using indexed journal articles, specialised books, and technical publications issued by international organisations concerned with agricultural water management. The collected information was organised into thematic categories and comparatively analysed to identify current trends,

advances, and challenges. The reviewed evidence demonstrates that the integration of pressurised irrigation systems, sensors, remote sensing, precision agriculture, artificial intelligence, and water reuse strategies has significantly improved water use efficiency. Nevertheless, important limitations remain regarding climate variability, irrigation infrastructure, implementation costs, and technology transfer. It is concluded that efficient water management requires multidisciplinary approaches integrating technological innovation, sustainable water resource management, and policies aimed at strengthening the resilience of agricultural systems in the face of current environmental challenges.

Keywords: efficient water management; precision irrigation; sustainable agriculture; water productivity; water use efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua constituye uno de los principales factores que condicionan la productividad agrícola y la seguridad alimentaria a nivel mundial. La agricultura representa aproximadamente el 70 % del agua dulce extraída a escala global, lo que la convierte en el sector con mayor demanda de recursos hídricos (FAO, 2022). Sin embargo, el crecimiento poblacional, la expansión de las áreas cultivadas y los efectos cada vez más evidentes del cambio climático han incrementado la presión sobre este recurso, generando la necesidad de desarrollar estrategias que permitan mejorar su eficiencia sin comprometer la producción de alimentos (FAO, 2020). En este contexto, la gestión eficiente del agua ha dejado de ser una práctica orientada exclusivamente al ahorro hídrico para convertirse en un componente estratégico de la sostenibilidad agrícola y de la resiliencia de los sistemas productivos frente a escenarios de creciente escasez de agua.

Durante gran parte del siglo XX, las investigaciones relacionadas con el riego estuvieron orientadas principalmente al incremento de la disponibilidad del recurso mediante la construcción de infraestructura hidráulica y la expansión de las áreas irrigadas. Bajo este enfoque, la eficiencia se evaluaba fundamentalmente en función del volumen de agua distribuido hacia los cultivos (Bos et al., 2005). No obstante, el progresivo deterioro de las fuentes hídricas y la creciente competencia entre los sectores agrícola, urbano e industrial evidenciaron que el incremento de la oferta de agua no constituía una solución suficiente para enfrentar la escasez hídrica (Molden, 2007). Como consecuencia, la investigación comenzó a orientarse hacia el manejo integral del recurso, incorporando indicadores relacionados con la productividad del agua, la eficiencia del riego y la sostenibilidad ambiental, ampliando significativamente la perspectiva tradicional de evaluación (Molden, 2007).

Uno de los principales avances conceptuales ocurrió con la publicación del FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, donde Allen et al. (1998) establecieron procedimientos estandarizados para estimar la evapotranspiración de referencia mediante el método Penman-Monteith. Esta propuesta transformó la planificación del riego al proporcionar una metodología uniforme para calcular los requerimientos hídricos de los cultivos bajo diferentes condiciones climáticas. Desde entonces, dicho documento se ha consolidado como uno de los principales referentes internacionales para la programación del riego y la estimación de la evapotranspiración, siendo ampliamente utilizado tanto en investigaciones científicas como en programas de manejo agrícola desarrollados por organismos internacionales y centros de investigación.

La incorporación del concepto de productividad del agua representó otro cambio trascendental dentro de la evolución de la gestión hídrica. Howell (2001) argumentó que la evaluación de los sistemas de riego no debía limitarse exclusivamente a la eficiencia hidráulica, sino considerar simultáneamente la cantidad de producción obtenida por unidad de agua consumida. Posteriormente, Molden (2007) amplió esta perspectiva al proponer indicadores que integran dimensiones agronómicas, económicas y ambientales, permitiendo valorar el uso del agua desde un enfoque sistémico que trasciende el simple ahorro volumétrico y considera la sostenibilidad de los procesos productivos.

Las investigaciones desarrolladas por Pereira et al. (2012) fortalecieron este cambio conceptual al proponer nuevos indicadores de desempeño para evaluar la eficiencia del uso del agua en sistemas de riego. Según estos autores, los índices tradicionales resultan insuficientes para representar la complejidad de los sistemas agrícolas contemporáneos,

caracterizados por una elevada variabilidad climática, tecnológica y productiva. En consecuencia, recomiendan incorporar indicadores relacionados con la productividad hídrica, la uniformidad de aplicación, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental, lo que permite obtener una evaluación mucho más integral del desempeño de los sistemas de riego y facilita la toma de decisiones orientadas hacia un uso más racional del recurso.

Durante la última década, el desarrollo de tecnologías digitales ha impulsado una nueva transformación en la gestión del agua agrícola. La incorporación de sensores remotos, imágenes satelitales y redes de monitoreo ha permitido disponer de información continua sobre el estado hídrico de los cultivos y las condiciones ambientales (Kamiński et al., 2019). Paralelamente, el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y los sistemas de apoyo a la decisión han incrementado la precisión en la programación del riego mediante el análisis en tiempo real de variables como la humedad del suelo, el estado fisiológico de las plantas y las condiciones meteorológicas, favoreciendo una distribución más eficiente del agua y reduciendo significativamente las pérdidas ocasionadas por aplicaciones excesivas o insuficientes (Kamiński et al., 2019).

De manera paralela, diversos organismos internacionales han reforzado la necesidad de implementar estrategias integradas para enfrentar la creciente escasez de agua y mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha destacado que incrementar la productividad del agua constituye una prioridad para garantizar simultáneamente la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental (FAO, 2022). Asimismo, la FAO (2020) señala que la modernización de la infraestructura hidráulica y la incorporación de tecnologías digitales representan componentes esenciales para optimizar el manejo del recurso hídrico. En la misma línea, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura enfatiza la importancia de fortalecer la innovación tecnológica y la gestión integrada del agua para mejorar la competitividad del sector agropecuario (IICA, 2021), mientras que las plataformas de riego inteligente basadas en Internet de las Cosas permiten integrar sensores y datos ambientales para incrementar la eficiencia del riego en condiciones de escasez hídrica (Kamiński et al., 2019). En conjunto, estas iniciativas contribuyen directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la seguridad alimentaria, la adaptación al cambio climático y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

No obstante, a pesar del importante crecimiento de la evidencia científica durante las últimas décadas, persisten desafíos significativos relacionados con la adopción de tecnologías eficientes de riego, la evaluación de la productividad del agua en diferentes sistemas agrícolas y la integración efectiva de herramientas digitales dentro de los programas de manejo hídrico. Diversas investigaciones han demostrado que la eficiencia del uso del agua no depende exclusivamente de la tecnología implementada, sino también de factores climáticos, edáficos, económicos, institucionales y sociales que condicionan el desempeño de los sistemas agrícolas (Lankford, 2013). Del mismo modo, la interacción entre estos factores explica las diferencias observadas en la adopción y efectividad de las estrategias de gestión hídrica en distintos contextos productivos, lo que evidencia la necesidad de desarrollar enfoques multidisciplinarios capaces de integrar las dimensiones técnicas, ambientales y socioeconómicas del manejo del agua (Abedinpour & Sarangi, 2018).

El presente artículo tiene como objetivo analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre la gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas, examinando la evolución conceptual de la eficiencia hídrica, los principales indicadores utilizados para evaluar el desempeño del riego, las tecnologías emergentes para optimizar el uso del agua, las estrategias de adaptación frente al cambio climático, así como las limitaciones y perspectivas futuras para el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de carácter descriptivo-analítico, metodología ampliamente utilizada para sintetizar, integrar e interpretar de forma crítica el conocimiento científico disponible sobre un determinado campo de estudio (Grant & Booth, 2009). Este enfoque resulta especialmente pertinente cuando el objetivo consiste en examinar la evolución conceptual de una temática, identificar tendencias de investigación y analizar los principales avances científicos sin pretender estimar efectos cuantitativos mediante

procedimientos de metaanálisis (Snyder, 2019). En este sentido, la revisión se orientó a examinar la evidencia científica relacionada con la gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas, abordando la evolución de los conceptos de eficiencia hídrica, productividad del agua, tecnologías de riego, estrategias de adaptación al cambio climático y herramientas orientadas a fortalecer la sostenibilidad de los recursos hídricos en la agricultura. Asimismo, la investigación buscó identificar las principales convergencias, vacíos de conocimiento y desafíos que actualmente caracterizan este campo de investigación, siguiendo los principios metodológicos propuestos para revisiones narrativas de carácter integrador (Torraco, 2016).

La búsqueda documental se llevó a cabo mediante la consulta sistemática de bases de datos científicas de amplia cobertura internacional, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Scopus Preview y SciELO, debido a su reconocida calidad editorial y a su amplia cobertura en las áreas de ingeniería agrícola, recursos hídricos, hidrología, agronomía y sostenibilidad ambiental. Con el propósito de ampliar la cobertura de la evidencia científica, también se incorporaron documentos técnicos y publicaciones institucionales elaboradas por organismos internacionales especializados en la gestión del agua y el desarrollo agrícola, particularmente la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2021) y las publicaciones de la FAO sobre los desafíos del agua en la agricultura (FAO, 2020), cuyos informes constituyen referencias ampliamente reconocidas para el análisis de políticas, tecnologías y estrategias relacionadas con la gestión sostenible del agua en la agricultura.

La estrategia de búsqueda bibliográfica fue diseñada utilizando operadores booleanos (AND y OR) junto con combinaciones de descriptores en español e inglés, con el propósito de maximizar la recuperación de publicaciones relevantes y reducir el riesgo de sesgo documental (Xiao & Watson, 2019). Entre los principales términos empleados se incluyeron water management, water use efficiency, irrigation efficiency, water productivity, precision irrigation, smart irrigation, agricultural water management y climate-smart agriculture, además de sus equivalentes en español: gestión del agua, eficiencia del uso del agua, productividad hídrica, riego de precisión, gestión del riego, agricultura sostenible y agricultura climáticamente inteligente. La utilización de términos bilingües permitió ampliar significativamente la cobertura de la búsqueda y facilitar la incorporación de investigaciones desarrolladas en diferentes regiones geográficas, integrando tanto estudios de carácter experimental como investigaciones orientadas al desarrollo tecnológico y a la gestión integrada de los recursos hídricos.

Los criterios de selección fueron definidos previamente con el fin de garantizar la pertinencia y calidad de la evidencia incorporada durante el proceso de revisión (Page et al., 2021). Se incluyeron artículos científicos revisados por pares, revisiones bibliográficas, libros especializados, capítulos de libros e informes técnicos publicados principalmente entre 1998 y 2022, periodo que comprende desde la aparición del documento FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, que marcó un punto de inflexión en la estimación de la evapotranspiración y la programación del riego mediante el método Penman-Monteith (Allen et al., 1998), hasta las investigaciones más recientes relacionadas con agricultura de precisión, sensores inteligentes, inteligencia artificial y sistemas de apoyo a la decisión aplicados a la gestión eficiente del agua. Asimismo, se priorizaron aquellas publicaciones ampliamente reconocidas por su impacto científico, actualidad y relevancia para comprender la evolución de la eficiencia hídrica en diferentes sistemas agrícolas.

Por el contrario, fueron excluidos documentos duplicados, publicaciones sin revisión por pares, literatura de opinión y estudios que no proporcionaban información suficiente sobre la gestión eficiente del agua en agricultura o cuyo enfoque estuviera centrado exclusivamente en aspectos hidráulicos sin considerar la productividad del agua, la sostenibilidad ambiental o la eficiencia de los sistemas de riego. Del mismo modo, se descartaron investigaciones desactualizadas cuando existían estudios posteriores que ampliaban significativamente la evidencia disponible o incorporaban nuevos enfoques tecnológicos para la optimización del recurso hídrico, favoreciendo así la construcción de una revisión fundamentada en el conocimiento científico más actualizado.

Una vez seleccionadas las publicaciones, se desarrolló un proceso de lectura crítica, extracción de información y análisis comparativo, siguiendo las recomendaciones metodológicas propuestas para revisiones de literatura de carácter integrador (Grant & Booth, 2009). Con el propósito de facilitar la organización de la evidencia, los documentos fueron

clasificados en categorías temáticas relacionadas con la evolución conceptual de la gestión eficiente del agua, los indicadores de eficiencia y productividad hídrica, las tecnologías modernas de riego, la agricultura de precisión, la reutilización del agua, la adaptación al cambio climático, las limitaciones para la implementación de tecnologías y las perspectivas futuras de investigación. Esta clasificación permitió integrar resultados procedentes de investigaciones desarrolladas bajo diferentes enfoques metodológicos, favoreciendo la identificación de tendencias comunes, divergencias conceptuales y áreas donde aún persisten importantes vacíos de conocimiento (Snyder, 2019).

Finalmente, la información recopilada fue sintetizada mediante un enfoque narrativo e interpretativo, orientado a establecer relaciones entre los resultados reportados por diferentes investigaciones más que a describir individualmente cada estudio. Este procedimiento permitió analizar la evolución del conocimiento científico sobre la gestión eficiente del agua desde una perspectiva integradora, identificando los principales avances tecnológicos, las limitaciones metodológicas existentes y las oportunidades de investigación que actualmente orientan el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes. De esta manera, la revisión proporciona una visión crítica y actualizada del estado del conocimiento, en concordancia con los principios metodológicos propuestos para las revisiones narrativas contemporáneas (Torraco, 2016), contribuyendo a fortalecer la comprensión científica sobre la gestión sostenible de los recursos hídricos en la agricultura.

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

La gestión eficiente del agua en los sistemas agrícolas ha experimentado una profunda transformación conceptual como respuesta a la creciente presión ejercida sobre los recursos hídricos por el aumento de la demanda alimentaria, la expansión de la agricultura de regadío y los efectos derivados del cambio climático. En sus primeras etapas, el concepto de eficiencia estuvo estrechamente asociado al funcionamiento hidráulico de los sistemas de riego, priorizando la reducción de pérdidas durante la conducción, distribución y aplicación del agua sobre los cultivos (Bos et al., 2005). Bajo esta perspectiva, el desempeño de los sistemas agrícolas se evaluaba principalmente mediante indicadores físicos relacionados con el volumen de agua transportado o aplicado, asumiendo que una mayor eficiencia hidráulica implicaba automáticamente un mejor aprovechamiento del recurso. Sin embargo, el progresivo deterioro de las fuentes hídricas y la creciente competencia por el agua entre los sectores agrícola, urbano e industrial evidenciaron que este enfoque resultaba insuficiente para responder a los desafíos que enfrentan actualmente los sistemas productivos, impulsando el desarrollo de nuevas aproximaciones orientadas hacia una gestión integral del recurso.

Durante gran parte del siglo XX, las principales innovaciones estuvieron dirigidas al mejoramiento de la infraestructura hidráulica mediante la construcción de canales revestidos, sistemas presurizados y tecnologías destinadas a disminuir las pérdidas ocasionadas por infiltración, evaporación y escorrentía. En consecuencia, la eficiencia del riego era interpretada principalmente como la capacidad de transportar el mayor volumen posible de agua desde la fuente hasta el cultivo con el menor nivel de pérdidas técnicas (Tarjuelo, 2005). Aunque estas mejoras permitieron incrementar considerablemente el desempeño operativo de numerosos sistemas de irrigación, con el tiempo se hizo evidente que la reducción de pérdidas hidráulicas no garantizaba necesariamente un uso más sostenible del recurso, ya que aspectos como la respuesta fisiológica de los cultivos, la variabilidad climática y las características del suelo también condicionaban de manera importante la eficiencia real del agua aplicada.

Un cambio trascendental en la evolución de este campo ocurrió con la publicación del documento *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, en el cual Allen et al. (1998) establecieron el método FAO Penman-Monteith como estándar internacional para la estimación de la evapotranspiración de referencia. Esta metodología permitió calcular con mayor precisión los requerimientos hídricos de los cultivos considerando variables climáticas, fisiológicas y ambientales, sustituyendo progresivamente los métodos empíricos utilizados durante décadas. La incorporación de este procedimiento transformó la programación del riego al fundamentar las decisiones de aplicación del agua en la demanda real de las plantas y no únicamente en calendarios

previamente establecidos, favoreciendo una utilización más racional del recurso y mejorando simultáneamente la productividad agrícola.

A comienzos del siglo XXI, el concepto de eficiencia hídrica continuó evolucionando mediante la incorporación de enfoques centrados en la productividad del agua. Howell (2001) planteó que la evaluación de los sistemas de riego debía trascender la eficiencia hidráulica tradicional para considerar la relación existente entre la producción obtenida y el volumen de agua utilizado durante todo el proceso productivo. Esta propuesta representó un cambio conceptual significativo, ya que desplazó el interés desde la cantidad de agua distribuida hacia la capacidad del sistema para generar mayor rendimiento utilizando menores volúmenes del recurso. Posteriormente, Molden (2007) amplió aún más esta perspectiva al introducir el concepto de productividad del agua, argumentando que el objetivo principal no consiste únicamente en ahorrar agua, sino en maximizar el valor económico, social y ambiental generado por cada unidad utilizada. De esta manera, la gestión eficiente comenzó a integrar dimensiones relacionadas con la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el manejo integrado de los recursos hídricos, consolidando una visión mucho más amplia que la tradicional evaluación hidráulica.

La consolidación de este nuevo paradigma fue fortalecida por las investigaciones desarrolladas por Pereira et al. (2012), quienes propusieron indicadores capaces de evaluar simultáneamente la productividad agrícola, la eficiencia energética, la uniformidad de aplicación del riego, la calidad del recurso hídrico y los impactos ambientales derivados del manejo del agua. Desde esta perspectiva, la eficiencia dejó de entenderse como un indicador aislado para convertirse en un concepto multidimensional que integra variables técnicas, económicas y ambientales dentro de un mismo sistema de evaluación. Este enfoque ha permitido desarrollar herramientas más precisas para comparar diferentes estrategias de riego y analizar su contribución al uso sostenible del agua, facilitando además la toma de decisiones orientadas hacia una agricultura más resiliente frente a las condiciones de variabilidad climática.

Paralelamente, comenzaron a surgir cuestionamientos respecto a la interpretación tradicional del concepto de eficiencia. Lankford (2013) advirtió que una elevada eficiencia técnica a nivel parcelario no necesariamente implica una mejor gestión del agua cuando el análisis se realiza a escala de cuenca hidrográfica. El autor demostró que parte del agua considerada como pérdida durante el proceso de riego puede reincorporarse posteriormente al sistema hidrológico mediante procesos naturales de infiltración, escorrentía subsuperficial o recarga de acuíferos, contribuyendo nuevamente a la disponibilidad del recurso en otras zonas. Esta perspectiva modificó significativamente la forma de interpretar los balances hídricos, promoviendo enfoques de gestión integrada que consideran simultáneamente las interacciones existentes entre el suelo, el agua, los cultivos y los ecosistemas asociados, superando la visión reduccionista centrada únicamente en la eficiencia de aplicación.

Durante la última década, la evolución conceptual de la gestión eficiente del agua ha estado estrechamente vinculada con el desarrollo de la agricultura digital y las tecnologías de precisión. La incorporación de sensores de humedad del suelo, imágenes satelitales, redes de monitoreo climático, Internet de las Cosas, inteligencia artificial y sistemas de apoyo a la decisión ha permitido optimizar la programación del riego mediante información obtenida en tiempo real sobre las condiciones del cultivo y del ambiente (FAO, 2020). Este cambio tecnológico ha favorecido una transición desde modelos de gestión basados en calendarios fijos hacia sistemas capaces de adaptar continuamente la aplicación del agua de acuerdo con las necesidades reales de las plantas y las condiciones ambientales (Kamiński et al., 2019). De manera complementaria, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura ha destacado que la digitalización constituye uno de los principales factores para incrementar la eficiencia del uso del agua, fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas y mejorar la competitividad del sector agropecuario (IICA, 2021). En la misma línea, la FAO enfatiza que la sostenibilidad futura de la agricultura dependerá de la capacidad para integrar innovación tecnológica, monitoreo permanente y gestión inteligente de los recursos hídricos dentro de estrategias orientadas a maximizar simultáneamente la productividad, la conservación ambiental y la adaptación frente al cambio climático (FAO, 2022). En consecuencia, el concepto contemporáneo de gestión eficiente del agua ha dejado de centrarse exclusivamente en el ahorro del recurso para consolidarse como un enfoque integral que combina conocimiento

científico, innovación tecnológica y sostenibilidad con el propósito de garantizar la seguridad hídrica y alimentaria en escenarios de creciente incertidumbre climática.

Evolución de los indicadores de eficiencia y productividad del agua

La evaluación de la eficiencia en el uso del agua ha experimentado una evolución conceptual considerable durante las últimas décadas, reflejando los cambios ocurridos en la propia concepción de la gestión de los recursos hídricos en la agricultura. Inicialmente, la valoración del desempeño de los sistemas de riego estuvo centrada casi exclusivamente en indicadores hidráulicos destinados a cuantificar las pérdidas de agua durante los procesos de conducción, distribución y aplicación. Bajo este enfoque, una mayor eficiencia se asociaba con la reducción de infiltraciones, escorrentías y evaporación dentro de la infraestructura hidráulica, asumiendo que la disminución de estas pérdidas implicaba automáticamente un mejor aprovechamiento del recurso (Bos et al., 2005). Sin embargo, conforme aumentó la complejidad de los sistemas agrícolas y se intensificaron los problemas derivados de la escasez hídrica, comenzó a reconocerse que la eficiencia técnica por sí sola no era suficiente para representar el verdadero desempeño de los sistemas de riego, dando lugar al desarrollo de indicadores capaces de integrar simultáneamente dimensiones productivas, ambientales y socioeconómicas.

Las primeras metodologías de evaluación desempeñaron un papel fundamental en la modernización de la infraestructura de riego, ya que permitieron identificar deficiencias operativas y orientar inversiones destinadas a mejorar canales, tuberías, sistemas presurizados y mecanismos de distribución del agua (Bos et al., 2005). No obstante, estos indicadores presentaban limitaciones importantes, debido a que concentraban su atención en el comportamiento físico del agua sin considerar la respuesta fisiológica de los cultivos, la productividad alcanzada ni la interacción existente entre el manejo del riego y las condiciones ambientales. Esta visión reduccionista fue progresivamente cuestionada por la comunidad científica, que comenzó a promover enfoques de evaluación más amplios, capaces de explicar la eficiencia del agua desde la perspectiva del sistema agrícola en su conjunto y no únicamente desde el funcionamiento hidráulico de la infraestructura.

Un avance decisivo en esta transformación metodológica ocurrió con la publicación del documento *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, donde Allen et al. (1998) establecieron el método FAO Penman-Monteith como estándar internacional para la estimación de la evapotranspiración de referencia. La incorporación de esta metodología permitió calcular con mayor precisión las necesidades hídricas de los cultivos considerando las condiciones climáticas locales y el comportamiento fisiológico de las plantas, sustituyendo progresivamente los métodos empíricos utilizados hasta ese momento. Como consecuencia, la programación del riego comenzó a fundamentarse en la demanda real de agua por parte de los cultivos, favoreciendo una asignación más eficiente del recurso y reduciendo tanto los déficits como las aplicaciones excesivas que afectan simultáneamente la productividad agrícola y la conservación de los recursos hídricos.

La evolución conceptual continuó fortaleciéndose cuando Howell (2001) propuso incorporar el concepto de eficiencia en el uso del agua (*Water Use Efficiency*), definido como la relación entre la producción obtenida y el volumen de agua utilizado durante el proceso productivo. Esta propuesta representó un cambio sustancial respecto a los indicadores tradicionales, ya que desplazó el interés desde la cantidad de agua aplicada hacia la capacidad del sistema agrícola para transformar dicho recurso en producción. Posteriormente, Molden (2007) amplió considerablemente esta perspectiva al desarrollar el concepto de productividad del agua, argumentando que el objetivo principal de la gestión hídrica debía consistir en maximizar el valor económico, social y ambiental generado por cada unidad de agua utilizada. De esta manera, la evaluación dejó de limitarse exclusivamente al rendimiento agrícola para incorporar aspectos relacionados con la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental, la eficiencia económica y el manejo integrado de los recursos hídricos, consolidando un enfoque mucho más amplio para la toma de decisiones en agricultura.

Las investigaciones desarrolladas por Pereira et al. (2012) consolidaron esta evolución al proponer indicadores capaces de integrar simultáneamente variables relacionadas con la eficiencia de aplicación, la productividad hídrica, el consumo energético, la uniformidad del riego y el desempeño ambiental. Desde esta perspectiva, los autores sostienen

que la evaluación de los sistemas agrícolas debe realizarse considerando el funcionamiento integral del sistema y las interacciones existentes entre los diferentes componentes que participan en el proceso productivo. Este enfoque multidimensional ha sido ampliamente adoptado por investigaciones recientes debido a que proporciona una representación más realista de la complejidad que caracteriza a los sistemas agrícolas modernos y facilita la comparación de diferentes estrategias de manejo del agua bajo escenarios de creciente variabilidad climática.

Paralelamente, comenzaron a surgir importantes cuestionamientos sobre la interpretación tradicional del concepto de eficiencia hídrica. Lankford (2013) señaló que una elevada eficiencia de aplicación observada a nivel parcelario no necesariamente implica un ahorro efectivo del recurso cuando el análisis se realiza a escala de cuenca hidrográfica. Según este autor, parte del agua considerada como pérdida durante el riego puede reincorporarse posteriormente al ciclo hidrológico mediante procesos naturales de infiltración, drenaje o recarga de acuíferos, contribuyendo nuevamente a la disponibilidad del recurso para otros usuarios. Esta visión sistémica permitió comprender que la eficiencia del agua depende no solamente del volumen aplicado sobre los cultivos, sino también del destino posterior del recurso dentro del sistema hidrológico, promoviendo el desarrollo de indicadores que consideran simultáneamente las diferentes escalas espaciales y temporales del manejo del agua.

Durante los últimos años, la disponibilidad de tecnologías digitales ha impulsado una nueva etapa en la evolución de los indicadores de eficiencia hídrica. La incorporación de sensores remotos, imágenes satelitales, plataformas de monitoreo y modelos basados en inteligencia artificial ha permitido combinar indicadores tradicionales con información obtenida en tiempo real sobre evapotranspiración, humedad del suelo, desarrollo fenológico y productividad de los cultivos (Bastiaanssen et al., 2020). De manera complementaria, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha señalado que la evaluación moderna de la eficiencia del agua debe integrar variables relacionadas con la disponibilidad hídrica, la productividad agrícola, la sostenibilidad ambiental, la resiliencia frente al cambio climático y la eficiencia energética, favoreciendo una gestión adaptativa basada en evidencia científica (FAO, 2020). En consecuencia, los indicadores contemporáneos han evolucionado desde simples herramientas de evaluación hidráulica hacia instrumentos estratégicos de apoyo a la toma de decisiones, capaces de integrar información agronómica, económica, ambiental y tecnológica dentro de un mismo marco de análisis.

En conjunto, la literatura científica evidencia una transición progresiva desde indicadores centrados exclusivamente en la eficiencia hidráulica hacia modelos multidimensionales que incorporan la productividad del agua, la sostenibilidad ambiental, la innovación tecnológica y la resiliencia de los sistemas agrícolas. Esta evolución refleja el cambio de paradigma experimentado por la gestión de los recursos hídricos durante las últimas décadas, donde el propósito ya no consiste únicamente en reducir pérdidas de agua, sino en maximizar el valor generado por cada unidad del recurso mediante estrategias de manejo cada vez más precisas, sostenibles e inteligentes. Desde esta perspectiva, la evaluación de la eficiencia hídrica se ha convertido en un componente fundamental para orientar las políticas de gestión del agua, apoyar la modernización de los sistemas de riego y fortalecer la seguridad alimentaria frente a los desafíos que plantea el cambio climático y la creciente escasez de recursos hídricos.

Gestión integrada del agua: evolución hacia un enfoque sostenible

La evolución del concepto de gestión eficiente del agua ha estado estrechamente vinculada con una transformación en la manera de comprender la administración de los recursos hídricos dentro de los sistemas agrícolas. Mientras que las primeras políticas de riego estuvieron orientadas principalmente a incrementar la disponibilidad del recurso mediante la construcción de presas, canales y otras obras de infraestructura hidráulica, las investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que este enfoque resulta insuficiente para responder a los desafíos actuales relacionados con la escasez de agua, la degradación ambiental y la creciente demanda alimentaria (FAO, 2022). En consecuencia, el concepto de gestión integrada ha adquirido una relevancia creciente al promover una planificación que articula simultáneamente dimensiones ambientales, económicas, sociales e institucionales, reconociendo que la sostenibilidad del recurso depende tanto de su disponibilidad física como de la forma en que es administrado y distribuido entre los diferentes usuarios.

La necesidad de avanzar hacia modelos de gestión integrada comenzó a consolidarse a medida que aumentó la competencia por el agua entre la agricultura, el crecimiento urbano, la industria y la conservación de los ecosistemas. En este contexto, Molden (2007) señala que la expansión de las actividades productivas evidenció las limitaciones de las estrategias basadas exclusivamente en incrementar la oferta hídrica mediante infraestructura, ya que la disponibilidad del recurso comenzó a verse condicionada por múltiples factores ambientales y socioeconómicos. Como resultado, la gestión del agua dejó de concebirse únicamente como un problema de ingeniería hidráulica para convertirse en un proceso de planificación territorial que requiere equilibrar las necesidades de los distintos sectores productivos con la conservación de los ecosistemas y la seguridad alimentaria.

Esta transformación conceptual también implicó reconocer que la eficiencia técnica no garantiza por sí sola una utilización sostenible del recurso. Bos et al. (2005) sostienen que el desempeño de los sistemas de riego depende, además de la infraestructura hidráulica, de la existencia de mecanismos eficaces de gobernanza, coordinación institucional y participación activa de los diferentes usuarios involucrados en la administración del agua. Desde esta perspectiva, la gestión integrada incorpora procesos de planificación, regulación, mantenimiento de la infraestructura y fortalecimiento institucional que permiten optimizar el uso del recurso de manera equitativa y sostenible. En consecuencia, la eficiencia del riego comenzó a interpretarse como el resultado de la interacción entre factores técnicos, organizacionales y sociales, ampliando considerablemente el alcance de los modelos tradicionales de administración hídrica.

Durante los últimos años, diversos organismos internacionales han fortalecido este enfoque mediante la formulación de estrategias orientadas a integrar innovación tecnológica, desarrollo institucional y sostenibilidad ambiental. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura destaca que la gestión eficiente del agua requiere fortalecer las capacidades técnicas de los productores, promover programas permanentes de capacitación e impulsar procesos de innovación adaptados a las condiciones productivas y climáticas de cada territorio (IICA, 2021). De forma complementaria, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura enfatiza que la sostenibilidad hídrica depende de la combinación de tecnologías eficientes de riego con políticas públicas destinadas a proteger las fuentes de agua, modernizar la infraestructura hidráulica y fomentar prácticas agrícolas compatibles con la conservación de los recursos naturales (FAO, 2022). Estas propuestas evidencian que la gestión integrada trasciende la dimensión tecnológica para incorporar instrumentos de planificación, gobernanza y desarrollo territorial.

Un avance particularmente relevante en esta evolución corresponde al enfoque de agricultura climáticamente inteligente analizado por la FAO en *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture* (FAO, 2020). Este planteamiento propone articular la gestión del agua con estrategias de adaptación al cambio climático, integrando objetivos relacionados con la eficiencia del riego, la conservación de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a eventos climáticos extremos. De esta manera, el manejo del recurso hídrico deja de entenderse como un proceso aislado para convertirse en un componente estratégico de los programas de desarrollo sostenible, donde la disponibilidad de agua, la productividad agrícola y la protección ambiental forman parte de un mismo sistema de planificación.

La incorporación de tecnologías digitales ha reforzado significativamente este nuevo paradigma de gestión integrada. Kamienski et al. (2019) destacan que el uso de sensores de humedad, plataformas de monitoreo y herramientas digitales para evaluar el consumo hídrico permite conocer con mayor precisión la dinámica del agua en el suelo y las necesidades reales de los cultivos, facilitando una programación del riego más eficiente y reduciendo pérdidas innecesarias del recurso (Kamienski et al., 2019). Estas tecnologías no solo incrementan la precisión de las decisiones agronómicas, sino que también generan información estratégica para apoyar la planificación de los recursos hídricos a escalas regionales y de cuenca, fortaleciendo la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas frente a escenarios de creciente incertidumbre climática.

En este contexto, las investigaciones más recientes coinciden en que la gestión integrada constituye una condición indispensable para enfrentar los desafíos asociados con el cambio climático y la variabilidad de la disponibilidad hídrica. Abedinpour y Sarangi (2018) señalan que la incertidumbre climática exige sistemas de gestión capaces de incorporar

información meteorológica, indicadores de productividad del agua y herramientas de apoyo a la toma de decisiones que permitan ajustar oportunamente las estrategias de riego. Este enfoque favorece una administración más flexible y resiliente del recurso, capaz de responder a las variaciones ambientales sin comprometer la productividad agrícola ni la sostenibilidad de los ecosistemas.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la gestión del agua ha evolucionado desde un modelo centrado casi exclusivamente en la construcción y operación de infraestructura hidráulica hacia un enfoque integral que combina innovación tecnológica, gobernanza, planificación territorial, fortalecimiento institucional y sostenibilidad ambiental. Esta transformación refleja un cambio profundo en la manera de comprender la administración de los recursos hídricos, donde el objetivo ya no consiste únicamente en distribuir mayores volúmenes de agua, sino en optimizar su utilización mediante estrategias adaptativas que garanticen simultáneamente la productividad agrícola, la conservación de los ecosistemas y la seguridad hídrica frente a los desafíos del cambio climático. Este paradigma constituye actualmente el fundamento de las principales políticas internacionales orientadas al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles, resilientes y eficientes en el uso del agua.

TECNOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

El desarrollo tecnológico ha transformado profundamente la gestión del agua en los sistemas agrícolas, modificando la manera en que se planifica, distribuye y monitorea el recurso hídrico. Mientras que las primeras innovaciones estuvieron orientadas principalmente a mejorar la eficiencia hidráulica mediante la modernización de la infraestructura de riego, las investigaciones más recientes incorporan herramientas digitales capaces de integrar información climática, agronómica y fisiológica para optimizar la toma de decisiones (FAO, 2022). Este cambio responde a la necesidad de enfrentar simultáneamente la creciente escasez de agua, la expansión de la producción agrícola y los efectos del cambio climático, factores que han impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas no solo a reducir las pérdidas de agua, sino también a maximizar la productividad obtenida por cada unidad del recurso utilizada (Kamiński et al., 2019).

La evolución tecnológica ha permitido sustituir progresivamente los esquemas tradicionales de programación del riego por sistemas inteligentes que utilizan sensores, plataformas digitales, modelos de simulación e inteligencia artificial para ajustar la aplicación del agua de acuerdo con las condiciones específicas del suelo, el cultivo y el ambiente. En consecuencia, la gestión eficiente del agua ha dejado de depender exclusivamente de la infraestructura hidráulica para incorporar procesos continuos de monitoreo, análisis de información y automatización que incrementan significativamente la precisión en la distribución del recurso. Este nuevo paradigma ha favorecido el desarrollo de una agricultura más sostenible, donde la eficiencia hídrica se relaciona simultáneamente con la productividad agrícola, la conservación ambiental, la eficiencia energética y la resiliencia frente a la variabilidad climática (FAO, 2020).

No obstante, la evidencia científica coincide en señalar que ninguna tecnología garantiza por sí sola un uso eficiente del agua. Howell (2001) sostiene que el desempeño de cualquier sistema de riego depende de la interacción entre múltiples factores, entre ellos el diseño hidráulico, la programación de las aplicaciones, las características físicas del suelo, las condiciones climáticas y el manejo agronómico desarrollado durante el ciclo del cultivo. En la misma línea, Pereira et al. (2012) destacan que la eficiencia hídrica debe analizarse desde una perspectiva sistémica, considerando el funcionamiento integral del sistema agrícola y las interacciones existentes entre sus diferentes componentes, más que evaluar únicamente la eficiencia técnica del método de irrigación empleado. Esta visión multidimensional explica por qué las tecnologías actuales combinan infraestructura, monitoreo ambiental, automatización y análisis de datos dentro de un mismo proceso de gestión del recurso hídrico.

Evolución de los sistemas de riego: de los métodos tradicionales a la irrigación de alta eficiencia

La evolución de los sistemas de riego constituye uno de los procesos tecnológicos más importantes en la transformación de la agricultura moderna, reflejando el tránsito desde métodos orientados principalmente a garantizar el suministro de agua hacia estrategias destinadas a optimizar simultáneamente la productividad agrícola,

la eficiencia hídrica y la sostenibilidad ambiental. Durante gran parte del siglo XX, el riego por superficie fue el método predominante debido a su bajo costo de implementación, la simplicidad de su operación y la limitada disponibilidad de tecnologías alternativas. Sin embargo, numerosas investigaciones demostraron que estos sistemas presentaban importantes pérdidas ocasionadas por escorrentía superficial, infiltración profunda y evaporación, reduciendo considerablemente la eficiencia del aprovechamiento del recurso hídrico y limitando su capacidad para responder a las crecientes demandas de producción agrícola (Bos et al., 2005).

La identificación de estas limitaciones impulsó un proceso continuo de innovación orientado al desarrollo de sistemas presurizados capaces de mejorar la uniformidad de aplicación y disminuir las pérdidas de agua durante el riego. Playán y Mateos (2006) destacan que la incorporación de tecnologías de aspersión y, posteriormente, de riego localizado representó un cambio significativo respecto a los métodos tradicionales, al permitir una distribución más homogénea del agua y un mayor control sobre los volúmenes aplicados. No obstante, los autores también señalan que el desempeño de estos sistemas depende en gran medida de la calidad del diseño hidráulico, el mantenimiento periódico de los equipos y la correcta programación de las aplicaciones, factores que continúan siendo determinantes para alcanzar elevados niveles de eficiencia.

La evolución tecnológica continuó fortaleciendo el desempeño de los sistemas presurizados mediante mejoras en el diseño de emisores, la regulación automática de presiones y la incorporación de mecanismos de control que incrementaron la precisión de la aplicación del agua. Tarjuelo (2005) explica que estas innovaciones permitieron reducir significativamente las pérdidas ocasionadas por deriva y evaporación, especialmente en los sistemas de aspersión, favoreciendo una distribución más uniforme sobre la superficie cultivada. Sin embargo, también advierte que la eficiencia de estos métodos continúa condicionada por variables ambientales como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa, las cuales pueden modificar sustancialmente el comportamiento hidráulico del sistema y afectar el aprovechamiento real del agua aplicada.

En los últimos años, la modernización del riego ha dejado de evaluarse únicamente desde la perspectiva hidráulica para incorporar criterios relacionados con la productividad del agua, la eficiencia energética y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Bastiaanssen et al. (2020) sostienen que las nuevas tecnologías deben contribuir simultáneamente a incrementar el rendimiento de los cultivos, reducir el consumo de agua y minimizar el impacto ambiental asociado a la producción agrícola. Este enfoque representa una evolución respecto a las primeras etapas de modernización, donde el principal objetivo consistía en optimizar la distribución física del recurso sin considerar plenamente las interacciones existentes entre el manejo del riego, la productividad agrícola y la conservación de los ecosistemas.

Como resultado de esta evolución, los sistemas modernos de riego han incorporado progresivamente herramientas digitales capaces de integrar información meteorológica, sensores de humedad del suelo, modelos de evapotranspiración y plataformas automatizadas para ajustar dinámicamente la aplicación del agua según las necesidades específicas de cada cultivo (FAO, 2022). Esta integración tecnológica ha permitido superar el enfoque tradicional basado en calendarios fijos de riego, favoreciendo estrategias adaptativas que responden continuamente a las variaciones ambientales y fisiológicas presentes durante el desarrollo de los cultivos (Kamiński et al., 2019). En consecuencia, la evolución de los sistemas de riego refleja el tránsito desde tecnologías centradas exclusivamente en el transporte y distribución del agua hacia modelos inteligentes de gestión que combinan infraestructura, monitoreo, automatización y análisis de datos para maximizar la eficiencia hídrica y fortalecer la sostenibilidad de la agricultura contemporánea.

Riego por goteo: consolidación como referente de eficiencia hídrica

Entre las tecnologías desarrolladas para optimizar el uso del agua en agricultura, el riego por goteo se ha consolidado como uno de los sistemas de mayor eficiencia debido a su capacidad para suministrar el recurso directamente en la zona radicular de las plantas, reduciendo significativamente las pérdidas ocasionadas por evaporación superficial, escorrentía e infiltración profunda. Aunque esta tecnología comenzó a implementarse comercialmente hace varias décadas, su evolución ha estado marcada por un proceso continuo de innovación que incorpora sistemas

automatizados de control, regulación de caudales, fertirrigación y monitoreo digital, ampliando considerablemente sus posibilidades de aplicación en distintos sistemas productivos (Keller & Bliesner, 2018). En consecuencia, el riego por goteo ha dejado de considerarse únicamente un método de aplicación localizada del agua para convertirse en un componente estratégico de los programas modernos de gestión eficiente de los recursos hídricos.

Las primeras investigaciones sobre esta tecnología destacaban principalmente su capacidad para reducir las pérdidas de agua mediante aplicaciones localizadas de bajo caudal. Sin embargo, el desarrollo científico posterior permitió demostrar que sus ventajas trascienden ampliamente el ahorro hídrico. Keller y Bliesner (2018) señalan que la principal fortaleza del riego por goteo reside en la posibilidad de ajustar con elevada precisión tanto el volumen como la frecuencia de aplicación del agua según las necesidades fisiológicas de cada cultivo y las características particulares del suelo. Este nivel de precisión favorece una mayor disponibilidad de agua y nutrientes en la zona de absorción radicular, incrementando simultáneamente la eficiencia en el uso del agua, la productividad agrícola y la calidad de las cosechas. La literatura también coincide en que el riego localizado representa una de las estrategias más eficaces para incrementar la productividad hídrica en regiones donde la disponibilidad de agua constituye un factor limitante para la producción agrícola. Playán y Mateos (2006) destacan que la aplicación localizada permite optimizar la distribución del recurso y reducir considerablemente el consumo total de agua sin afectar el rendimiento de los cultivos. No obstante, los autores advierten que el elevado desempeño de estos sistemas depende de un adecuado diseño hidráulico, del mantenimiento periódico de los emisores y de una programación técnica que considere las condiciones climáticas, el desarrollo fenológico del cultivo y la variabilidad espacial del suelo. De esta manera, la eficiencia alcanzada no depende exclusivamente de la tecnología instalada, sino también de la calidad del manejo agronómico implementado durante todo el ciclo productivo.

Durante los últimos años, el papel del riego por goteo ha adquirido una dimensión aún más amplia al integrarse con las estrategias de agricultura sostenible y adaptación frente al cambio climático. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura destaca que esta tecnología constituye uno de los pilares fundamentales para incrementar la productividad del agua en escenarios de creciente escasez hídrica, especialmente cuando se combina con sistemas automatizados de monitoreo, sensores de humedad y herramientas digitales para la programación del riego (FAO, 2022). La incorporación de estas tecnologías permite ajustar continuamente la aplicación del agua según las necesidades reales del cultivo, disminuyendo el riesgo tanto de déficit hídrico como de sobreirrigación y favoreciendo una utilización más racional del recurso.

A pesar de sus reconocidas ventajas, la literatura científica advierte que la elevada eficiencia atribuida al riego por goteo no debe interpretarse como una característica inherente al sistema. Howell (2001) señala que una programación inadecuada puede generar pérdidas de agua comparables a las observadas en otros métodos de irrigación, reduciendo significativamente los beneficios potenciales de esta tecnología. Del mismo modo, problemas relacionados con la obstrucción de emisores, deficiencias en la filtración del agua o un mantenimiento insuficiente pueden afectar la uniformidad de aplicación y disminuir el desempeño hidráulico del sistema. Estas consideraciones evidencian que la eficiencia del riego por goteo depende de la integración entre infraestructura, monitoreo permanente y gestión técnica especializada, más que de la simple instalación de equipos modernos.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que el riego por goteo ha evolucionado desde una alternativa orientada principalmente al ahorro de agua hacia una tecnología integral de gestión hídrica capaz de combinar eficiencia de aplicación, automatización, fertirrigación y agricultura digital dentro de un mismo sistema productivo. Esta evolución refleja el cambio de paradigma experimentado por la agricultura moderna, donde la eficiencia del uso del agua ya no depende únicamente del método de riego empleado, sino de la capacidad para integrar tecnologías de monitoreo, análisis de información y toma de decisiones que permitan optimizar simultáneamente la productividad agrícola, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de los sistemas de producción frente a escenarios de creciente incertidumbre climática.

Riego por aspersión: avances tecnológicos y limitaciones actuales

El riego por aspersión constituye una de las tecnologías más ampliamente utilizadas en la agricultura moderna debido a su capacidad para distribuir el agua de forma relativamente uniforme sobre la superficie cultivada y adaptarse a una amplia variedad de cultivos, condiciones topográficas y sistemas de producción. Desde su incorporación a la agricultura tecnificada, este método ha experimentado un proceso continuo de perfeccionamiento orientado a incrementar la eficiencia de aplicación, reducir las pérdidas ocasionadas por evaporación y deriva, así como optimizar el consumo energético asociado a su funcionamiento (Tarjuelo, 2005). Como resultado, los sistemas actuales presentan un desempeño considerablemente superior al de las primeras generaciones de equipos utilizados durante el proceso inicial de modernización del riego.

Las primeras instalaciones de riego por aspersión presentaban limitaciones relacionadas con el diseño hidráulico, la regulación de presión y la uniformidad de distribución del agua, lo que ocasionaba aplicaciones heterogéneas y disminuía la eficiencia del sistema. Tarjuelo (2005) explica que el desarrollo de nuevos materiales, la incorporación de boquillas de mayor precisión y la automatización del control hidráulico permitieron corregir gran parte de estas deficiencias, mejorando significativamente la uniformidad del riego y reduciendo tanto las pérdidas de agua como los requerimientos energéticos. Estas innovaciones contribuyeron a consolidar el riego por aspersión como una alternativa altamente eficiente para numerosas condiciones agrícolas, especialmente en terrenos donde otros métodos presentan mayores restricciones operativas.

Sin embargo, la literatura demuestra que el desempeño de esta tecnología continúa dependiendo en gran medida de las condiciones ambientales durante la aplicación del riego. Playán y Mateos (2006) señalan que variables como la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa ejercen una influencia directa sobre las pérdidas por evaporación y deriva, modificando la cantidad efectiva de agua que finalmente alcanza la superficie del suelo. En consecuencia, los autores recomiendan que la programación del riego incorpore información meteorológica obtenida en tiempo real para seleccionar los momentos más adecuados de aplicación y minimizar las pérdidas asociadas a condiciones atmosféricas desfavorables.

La incorporación de tecnologías digitales ha permitido superar parcialmente estas limitaciones mediante el desarrollo de sistemas automatizados capaces de ajustar dinámicamente el funcionamiento de los equipos. Bastiaanssen et al. (2020) destacan que la integración de sensores climáticos, plataformas digitales y herramientas de agricultura de precisión permite modificar automáticamente la duración, frecuencia e intensidad del riego de acuerdo con las condiciones ambientales registradas durante cada aplicación. Este nivel de automatización favorece una utilización más eficiente del agua, reduce el desperdicio del recurso y disminuye simultáneamente el consumo energético, fortaleciendo la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola.

A pesar de estos avances tecnológicos, la evidencia científica continúa señalando que el riego por aspersión presenta limitaciones importantes en regiones caracterizadas por fuertes vientos, temperaturas elevadas y baja humedad atmosférica, condiciones que incrementan considerablemente las pérdidas de agua antes de que este alcance la superficie cultivada. Por esta razón, diversos estudios coinciden en que la eficiencia de estos sistemas depende de la integración entre un adecuado diseño hidráulico, el monitoreo permanente de las condiciones meteorológicas y la programación inteligente del riego, más que de las características técnicas del equipo utilizado. Bajo esta perspectiva, el riego por aspersión ha evolucionado desde un sistema mecánico de distribución del agua hacia una tecnología de gestión adaptativa que incorpora información climática y herramientas digitales para optimizar continuamente su desempeño.

En conjunto, la evolución del riego por aspersión evidencia cómo la innovación tecnológica ha permitido incrementar progresivamente la eficiencia de aplicación y ampliar las posibilidades de utilización de este sistema dentro de la agricultura moderna. No obstante, la literatura coincide en que su verdadero potencial se alcanza únicamente cuando se integra con plataformas de monitoreo, modelos meteorológicos y estrategias de agricultura de precisión que permitan ajustar dinámicamente la aplicación del agua según las condiciones ambientales y las necesidades reales de los cultivos, fortaleciendo así la productividad hídrica y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Agricultura de precisión y riego inteligente: una nueva etapa en la gestión del agua

La incorporación de la agricultura de precisión ha marcado un punto de inflexión en la gestión eficiente del agua al sustituir los esquemas convencionales de aplicación uniforme por estrategias capaces de responder a la variabilidad espacial y temporal presente dentro de los sistemas agrícolas. Durante muchos años, la programación del riego se fundamentó en la premisa de que las parcelas presentaban condiciones relativamente homogéneas, aplicándose el mismo volumen de agua sobre toda la superficie cultivada. Sin embargo, las investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que factores como la textura y estructura del suelo, la profundidad efectiva de las raíces, el contenido de humedad, la topografía y el estado fisiológico de los cultivos generan requerimientos hídricos diferenciados que no pueden ser atendidos eficientemente mediante programas uniformes de irrigación (Kamiński et al., 2019). Este conocimiento impulsó el desarrollo de tecnologías orientadas a ajustar la aplicación del agua según las condiciones particulares de cada sitio, favoreciendo una utilización mucho más eficiente del recurso.

Las primeras aplicaciones de la agricultura de precisión estuvieron dirigidas principalmente al empleo de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG) para caracterizar la variabilidad de los suelos y elaborar mapas de manejo agrícola. Con el avance de las tecnologías digitales, estas herramientas comenzaron a integrarse con sensores terrestres, imágenes satelitales, estaciones meteorológicas y modelos de simulación que permiten analizar simultáneamente múltiples variables relacionadas con el comportamiento del cultivo y del ambiente (FAO, 2022). Esta integración tecnológica ha ampliado considerablemente la capacidad para programar el riego con base en información objetiva y actualizada, sustituyendo progresivamente las decisiones fundamentadas únicamente en la experiencia del productor.

Uno de los principales aportes del riego inteligente consiste en su capacidad para transformar grandes volúmenes de información en decisiones operativas orientadas a optimizar la aplicación del agua. Kamiński et al. (2019) destacan que la integración de datos procedentes de estaciones meteorológicas, sensores de humedad del suelo, modelos de evapotranspiración y plataformas digitales permite determinar con elevada precisión tanto el momento oportuno para realizar el riego como el volumen requerido por cada cultivo según su estado de desarrollo. Este enfoque favorece la reducción simultánea del déficit hídrico y de las aplicaciones excesivas, mejorando la productividad del agua y disminuyendo el impacto ambiental asociado al uso ineficiente del recurso.

Esta perspectiva coincide con los planteamientos de Bastiaanssen et al. (2020), quienes consideran que la agricultura de precisión representa una evolución significativa respecto a los métodos tradicionales de programación del riego al incorporar información obtenida en tiempo real sobre las condiciones fisiológicas del cultivo y las características ambientales del sistema productivo. Desde esta visión, la eficiencia hídrica deja de depender exclusivamente del método de irrigación empleado para convertirse en el resultado de un proceso continuo de monitoreo, análisis y ajuste de las decisiones agronómicas. La combinación de tecnologías digitales con modelos predictivos permite, además, incrementar la productividad agrícola, reducir el consumo energético y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción bajo escenarios de creciente variabilidad climática.

A pesar de los importantes avances alcanzados, la literatura reconoce que la implementación de la agricultura de precisión continúa enfrentando diversos desafíos relacionados con los costos de inversión, la disponibilidad de infraestructura tecnológica y el acceso a capacitación especializada. La FAO (2020) señala que estas limitaciones afectan principalmente a pequeños y medianos productores, quienes con frecuencia presentan dificultades para acceder a equipos de monitoreo, plataformas digitales y servicios de conectividad. Por esta razón, diversos organismos internacionales proponen fortalecer los programas de transferencia tecnológica, asistencia técnica y formación profesional como estrategias fundamentales para ampliar la adopción de estas herramientas y reducir las brechas tecnológicas existentes entre diferentes regiones agrícolas.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la agricultura de precisión ha redefinido el concepto de gestión eficiente del agua al incorporar tecnologías capaces de adaptar continuamente la aplicación del recurso a las condiciones específicas del cultivo y del ambiente. Este cambio representa una transición desde modelos de manejo estáticos hacia sistemas inteligentes basados en información dinámica y análisis predictivo, donde la eficiencia hídrica

depende de la capacidad para integrar monitoreo permanente, automatización y apoyo a la toma de decisiones dentro de un mismo proceso de gestión agrícola.

Sensores e Internet de las Cosas (IoT): monitoreo en tiempo real para optimizar el riego

El desarrollo de sensores inteligentes y dispositivos conectados mediante Internet de las Cosas (IoT) constituye una de las innovaciones más relevantes en la evolución reciente de la gestión del agua en agricultura. Estas tecnologías permiten recopilar información continua sobre las condiciones del suelo, el cultivo y el ambiente, proporcionando datos precisos que fortalecen la programación del riego y favorecen una utilización más eficiente del recurso hídrico (Kamienski et al., 2019). A diferencia de los métodos tradicionales, fundamentados en calendarios de aplicación o estimaciones generales de evapotranspiración, los sistemas IoT ofrecen información actualizada en tiempo real, permitiendo adaptar las decisiones de riego a las condiciones específicas presentes en cada momento del ciclo productivo.

Durante décadas, la programación del riego dependió principalmente de la experiencia del agricultor y de criterios generales relacionados con la disponibilidad de agua y las características climáticas predominantes. Sin embargo, la creciente variabilidad espacial y temporal de las condiciones agrícolas evidenció las limitaciones de estos procedimientos tradicionales, particularmente en escenarios afectados por el cambio climático y la irregularidad de las precipitaciones. Como respuesta a esta problemática, la incorporación de sensores de humedad del suelo, temperatura, conductividad eléctrica, potencial hídrico y otras variables agronómicas ha permitido sustituir gradualmente estos esquemas por sistemas de monitoreo continuo capaces de representar con mayor precisión las necesidades reales de los cultivos (FAO, 2022).

La integración de estos sensores con plataformas digitales ha ampliado significativamente las posibilidades de automatización en la gestión del agua. Kamienski et al. (2019) señalan que los datos recopilados por dispositivos inalámbricos pueden transmitirse instantáneamente hacia aplicaciones móviles o plataformas de gestión agrícola, facilitando el seguimiento permanente del estado hídrico del cultivo y permitiendo modificar automáticamente la programación del riego cuando se detectan cambios en las condiciones ambientales. Este proceso reduce la necesidad de intervención manual, mejora la precisión de las decisiones agronómicas y contribuye a disminuir tanto el desperdicio de agua como los costos asociados a la operación de los sistemas de riego.

Desde una perspectiva más amplia, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura destaca que las tecnologías IoT favorecen una gestión integral de los recursos hídricos al reducir simultáneamente el riesgo de sobreirrigación y de estrés hídrico en los cultivos (FAO, 2020). Asimismo, estos sistemas optimizan la aplicación de fertilizantes cuando se utilizan estrategias de fertirrigación, mejorando de manera conjunta la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes. Esta capacidad para integrar múltiples procesos productivos convierte a los sensores inteligentes en herramientas estratégicas para fortalecer la sostenibilidad de la agricultura moderna y disminuir el impacto ambiental asociado a un manejo inadecuado de los insumos agrícolas.

No obstante, la adopción de estas tecnologías continúa condicionada por diversos factores económicos y tecnológicos. La literatura indica que la rentabilidad de los sistemas IoT depende del tamaño de la explotación agrícola, del costo de adquisición e instalación de los equipos y de la disponibilidad de infraestructura de conectividad que permita el intercambio permanente de información (FAO, 2022). A pesar de estas limitaciones, la reducción progresiva del precio de los sensores, el desarrollo de plataformas digitales más accesibles y la expansión de los servicios de comunicación han favorecido una incorporación creciente de estas herramientas incluso en explotaciones agrícolas de pequeña y mediana escala, ampliando considerablemente sus posibilidades de aplicación.

En conjunto, la evidencia científica posiciona a los sensores inteligentes y al Internet de las Cosas como componentes fundamentales de la agricultura digital, debido a su capacidad para proporcionar información continua, automatizar procesos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos. Su integración con otras tecnologías emergentes ha contribuido a transformar la programación del riego en un proceso dinámico y adaptativo, donde la eficiencia del uso

del agua depende cada vez más del monitoreo permanente, el análisis en tiempo real y la capacidad de responder oportunamente a las variaciones que experimentan los sistemas agrícolas durante su desarrollo.

Teledetección y monitoreo satelital: ampliando la escala de la gestión hídrica

El desarrollo de la teledetección y del monitoreo satelital ha transformado profundamente la forma en que se analiza el comportamiento hídrico de los sistemas agrícolas, ampliando la capacidad de evaluación desde el nivel parcelario hacia escalas regionales e incluso de cuenca hidrográfica. Tradicionalmente, la información utilizada para programar el riego procedía de mediciones puntuales realizadas directamente en campo, las cuales, aunque proporcionaban datos precisos, presentaban limitaciones para representar la elevada variabilidad espacial que caracteriza a los sistemas agrícolas. La incorporación de imágenes satelitales ha permitido superar estas restricciones al generar información continua sobre extensas superficies cultivadas, facilitando la identificación de zonas con déficit hídrico, diferencias en el desarrollo vegetativo y variaciones en la productividad de los cultivos (Bastiaanssen et al., 2020). En consecuencia, la teledetección se ha consolidado como una herramienta estratégica para fortalecer la planificación del riego y mejorar la administración sostenible de los recursos hídricos.

Uno de los avances más significativos en este ámbito corresponde al desarrollo de algoritmos destinados a estimar la evapotranspiración real de los cultivos mediante información obtenida por sensores remotos. Bastiaanssen et al. (2020) destacan que estos procedimientos permiten cuantificar con elevada precisión el consumo efectivo de agua por parte de las plantas, integrando variables relacionadas con la radiación solar, la temperatura superficial, la cobertura vegetal y el balance energético. Esta información proporciona una representación mucho más completa del comportamiento hídrico de los cultivos que la obtenida mediante mediciones puntuales, favoreciendo una programación del riego ajustada a las necesidades fisiológicas reales y contribuyendo a incrementar la productividad del agua en diferentes sistemas agrícolas.

La disponibilidad creciente de plataformas satelitales de acceso abierto ha ampliado considerablemente las posibilidades de aplicación de estas tecnologías tanto para la investigación como para la gestión agrícola. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que las imágenes de alta resolución espacial y temporal permiten realizar un seguimiento continuo del estado de los cultivos, identificar tempranamente situaciones de estrés hídrico y evaluar la evolución de la productividad agrícola durante todo el ciclo de crecimiento (FAO, 2020). Esta capacidad de monitoreo permanente favorece la toma de decisiones basada en evidencia objetiva y facilita la implementación de estrategias de riego diferenciadas según las condiciones particulares observadas en cada sector de la parcela.

Más allá de su utilidad para la programación del riego, la teledetección ha adquirido una importancia creciente en la planificación de los recursos hídricos a escalas regionales. Diversas investigaciones destacan que la integración de imágenes satelitales con modelos hidrológicos permite evaluar indicadores de productividad del agua, identificar patrones espaciales de consumo hídrico y analizar la distribución del recurso dentro de grandes áreas agrícolas (Bastiaanssen et al., 2020). Esta información resulta especialmente valiosa para los organismos responsables de la gestión del agua, ya que facilita la priorización de intervenciones en zonas con mayor presión sobre los recursos hídricos y fortalece la formulación de políticas públicas orientadas a mejorar la sostenibilidad del sector agrícola.

No obstante, la literatura científica también reconoce que la utilización de imágenes satelitales presenta limitaciones que deben considerarse durante su implementación. Factores como la resolución espacial de los sensores, la presencia de nubosidad persistente, la frecuencia de adquisición de imágenes y la necesidad de validar los datos mediante observaciones realizadas en campo pueden afectar la precisión de las estimaciones obtenidas (Kamienksi et al., 2019). Por esta razón, los estudios más recientes recomiendan integrar la información satelital con sensores terrestres, estaciones meteorológicas y modelos de simulación, construyendo sistemas de monitoreo complementarios que permitan mejorar la confiabilidad de los análisis y fortalecer la toma de decisiones relacionadas con el manejo del agua.

En conjunto, la evidencia científica demuestra que la teledetección representa mucho más que una herramienta para observar los cultivos desde el espacio; constituye un componente esencial de los sistemas modernos de gestión hídrica al proporcionar información espacial y temporal de alta calidad para apoyar la programación del riego, evaluar la productividad del agua y planificar la utilización sostenible de los recursos hídricos. Su integración con otras tecnologías digitales ha contribuido a consolidar una gestión agrícola basada en información continua y análisis predictivo, fortaleciendo la capacidad de adaptación de los sistemas productivos frente a los desafíos asociados con la escasez de agua y el cambio climático.

Inteligencia artificial y sistemas de apoyo a la decisión

La inteligencia artificial (IA) representa una de las innovaciones más recientes y prometedoras para la gestión eficiente del agua en los sistemas agrícolas, al incorporar capacidades avanzadas de procesamiento de información que permiten optimizar la programación del riego bajo condiciones altamente variables. A diferencia de los métodos convencionales, fundamentados en calendarios fijos o reglas previamente establecidas, los sistemas basados en aprendizaje automático (machine learning) son capaces de analizar grandes volúmenes de datos procedentes de múltiples fuentes, identificar patrones complejos y generar recomendaciones adaptadas a las condiciones específicas de cada cultivo y de cada ambiente de producción (Kamienski et al., 2019). Este cambio tecnológico ha permitido transformar la gestión del agua desde un enfoque predominantemente reactivo hacia modelos predictivos capaces de anticipar las necesidades hídricas antes de que se manifiesten situaciones de estrés en los cultivos.

La eficacia de estos sistemas radica en su capacidad para integrar información procedente de estaciones meteorológicas, sensores de humedad del suelo, imágenes satelitales, modelos de evapotranspiración, pronósticos climáticos y registros históricos de producción dentro de una misma plataforma de análisis. La combinación de estas fuentes de información permite estimar con mayor precisión el momento óptimo para aplicar el riego y determinar el volumen de agua requerido según el estado fenológico del cultivo y las condiciones ambientales predominantes (FAO, 2020). En consecuencia, la inteligencia artificial no sustituye los conocimientos agronómicos tradicionales, sino que amplía significativamente la capacidad para interpretar información compleja y apoyar decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Una de las principales ventajas de los sistemas de apoyo a la decisión basados en inteligencia artificial consiste en su capacidad de aprendizaje continuo. Kamienski et al. (2019) destacan que estos modelos ajustan progresivamente sus algoritmos conforme incorporan nueva información procedente de los sistemas de monitoreo, incrementando la precisión de las recomendaciones emitidas y reduciendo la incertidumbre asociada a la programación del riego. Esta característica resulta especialmente relevante en escenarios afectados por una elevada variabilidad climática, donde las condiciones ambientales cambian constantemente y requieren procesos de gestión mucho más flexibles que los proporcionados por los modelos tradicionales de planificación.

Desde una perspectiva más amplia, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura considera que la inteligencia artificial constituye uno de los pilares fundamentales de la agricultura digital debido a su capacidad para integrar tecnologías de monitoreo, automatización y análisis predictivo dentro de un mismo sistema de gestión (FAO, 2022). Sin embargo, el organismo también advierte que el aprovechamiento efectivo de estas herramientas depende de la disponibilidad de infraestructura tecnológica, conectividad, acceso a plataformas digitales y formación especializada de los usuarios. Estas condiciones explican por qué la adopción de la inteligencia artificial continúa siendo desigual entre regiones y sistemas productivos, particularmente en aquellos contextos donde persisten limitaciones económicas y tecnológicas.

A pesar de estos desafíos, la literatura coincide en señalar que la inteligencia artificial posee un elevado potencial para transformar la gestión del agua durante los próximos años. Su integración con sensores inteligentes, plataformas IoT, imágenes satelitales y modelos hidrológicos permite construir sistemas de apoyo a la decisión cada vez más precisos, capaces de responder dinámicamente a las variaciones ambientales y a las necesidades específicas de los cultivos. De esta manera, la programación del riego deja de fundamentarse exclusivamente en la experiencia del productor para

convertirse en un proceso respaldado por modelos predictivos que optimizan simultáneamente la productividad agrícola, la eficiencia en el uso del agua y la sostenibilidad ambiental.

En conjunto, la evidencia científica posiciona a la inteligencia artificial como uno de los componentes estratégicos de la agricultura inteligente y de los futuros sistemas de gestión integrada del agua. Más allá de la automatización de tareas específicas, estas tecnologías representan una nueva forma de comprender el manejo de los recursos hídricos, donde la toma de decisiones se fundamenta en el análisis continuo de grandes volúmenes de información y en la capacidad de anticipar escenarios futuros. Este cambio de paradigma fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático y abre nuevas oportunidades para incrementar la productividad del agua mediante procesos de gestión cada vez más precisos, adaptativos y sostenibles.

CAMBIO CLIMÁTICO Y GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

El cambio climático ha redefinido profundamente la manera en que la investigación científica aborda la gestión del agua en los sistemas agrícolas. Mientras que durante varias décadas las estrategias de eficiencia hídrica estuvieron orientadas principalmente a optimizar la distribución y el aprovechamiento del recurso disponible mediante mejoras en la infraestructura de riego y en las prácticas de manejo, la evidencia acumulada durante los últimos años demuestra que la disponibilidad de agua estará cada vez más condicionada por la creciente variabilidad climática. El incremento sostenido de la temperatura global, las alteraciones en los patrones de precipitación, la mayor frecuencia de sequías e inundaciones y la intensificación de eventos meteorológicos extremos modifican simultáneamente la oferta y la demanda hídrica, incrementando la incertidumbre sobre la planificación agrícola y la seguridad alimentaria (FAO, 2020). Como consecuencia, la gestión eficiente del agua ha evolucionado desde un enfoque centrado exclusivamente en el ahorro hacia modelos integrales que incorporan principios de adaptación, resiliencia y sostenibilidad frente a escenarios climáticos cambiantes.

Este cambio de paradigma también ha ampliado el concepto de eficiencia hídrica. En la actualidad, ya no resulta suficiente maximizar la cantidad de agua aprovechada por los cultivos, sino que es necesario desarrollar sistemas agrícolas capaces de responder dinámicamente a las modificaciones del clima mediante estrategias flexibles de gestión. Abedinpour y Sarangi (2018) señalan que las alteraciones observadas en la temperatura, la evapotranspiración y la disponibilidad de recursos hídricos obligan a replantear los métodos tradicionales de programación del riego, incorporando modelos predictivos capaces de ajustarse continuamente a las condiciones ambientales. Desde esta perspectiva, la gestión eficiente del agua constituye un componente esencial de la adaptación climática, integrando innovación tecnológica, planificación territorial, conservación ambiental y fortalecimiento institucional para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola en el largo plazo.

Variabilidad climática y disponibilidad del recurso hídrico

La disponibilidad de agua para la agricultura se encuentra cada vez más influenciada por la variabilidad climática, modificando significativamente las condiciones bajo las cuales se diseñaron gran parte de los sistemas de riego actualmente en funcionamiento. Durante décadas se asumió que las condiciones hidrológicas presentaban una estabilidad suficiente para planificar el manejo del recurso mediante registros históricos de precipitación y caudales. Sin embargo, las investigaciones recientes evidencian que esta premisa resulta cada vez menos válida debido a la creciente incertidumbre generada por el cambio climático, lo que incrementa la necesidad de adoptar enfoques adaptativos para la gestión del agua (FAO, 2020).

Diversos estudios coinciden en señalar que el aumento sostenido de la temperatura acelera los procesos de evapotranspiración, incrementando los requerimientos hídricos de numerosos cultivos, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la disponibilidad de agua ya constituye un factor limitante para la producción agrícola. Abedinpour y Sarangi (2018) sostienen que este fenómeno obliga a revisar permanentemente la programación del riego y a incorporar herramientas capaces de responder de manera dinámica a las variaciones meteorológicas. En

consecuencia, la eficiencia hídrica depende cada vez más de la capacidad para anticipar cambios ambientales y ajustar oportunamente las decisiones de manejo antes de que se manifiesten situaciones de estrés hídrico en los cultivos.

La variabilidad climática también genera efectos diferenciados según las características geográficas y ambientales de cada región. La FAO (2020) destaca que mientras algunos territorios experimentan reducciones progresivas de la disponibilidad hídrica como consecuencia de sequías más prolongadas, otros enfrentan incrementos en la frecuencia de lluvias intensas e inundaciones que deterioran la infraestructura de riego y afectan la estabilidad de los sistemas agrícolas. Esta heterogeneidad evidencia que las estrategias de gestión del agua no pueden diseñarse bajo criterios universales, sino que requieren procesos de planificación adaptados a las condiciones hidrológicas, climáticas y socioeconómicas de cada territorio.

Desde una perspectiva estratégica, Molden (2007) plantea que la planificación futura del recurso hídrico debe integrar simultáneamente la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, las proyecciones climáticas y la creciente competencia entre los diferentes sectores económicos que dependen del agua. Bajo este enfoque, la gestión eficiente deja de limitarse a mejorar el desempeño de los sistemas de riego para incorporar procesos de planificación integral que permitan equilibrar las necesidades productivas con la conservación de los ecosistemas y la sostenibilidad de los recursos hídricos. La literatura coincide, por tanto, en que la creciente variabilidad climática constituye uno de los principales desafíos para la agricultura contemporánea y exige el desarrollo de modelos de gestión cada vez más flexibles, resilientes y sustentados en información científica actualizada.

Agricultura climáticamente inteligente y eficiencia hídrica

La agricultura climáticamente inteligente se ha consolidado como uno de los enfoques más relevantes para enfrentar los desafíos derivados del cambio climático, integrando estrategias orientadas a incrementar la productividad agrícola, fortalecer la capacidad de adaptación de los sistemas productivos y reducir el impacto ambiental asociado al uso de los recursos naturales. Dentro de este modelo, la gestión eficiente del agua ocupa un papel central debido a que la disponibilidad hídrica condiciona simultáneamente la estabilidad de la producción, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los ecosistemas (FAO, 2020).

Más que proponer tecnologías aisladas, este enfoque plantea una transformación integral de los sistemas agrícolas mediante la incorporación de prácticas de manejo sostenible, innovación tecnológica, monitoreo ambiental y planificación basada en evidencia científica. La FAO (2020) destaca que la implementación de sistemas de riego eficientes, la conservación de la humedad del suelo, la reutilización segura del agua y el monitoreo permanente de las condiciones ambientales permiten reducir significativamente la vulnerabilidad de la agricultura frente a la variabilidad climática. Estas estrategias contribuyen no solo a optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, sino también a incrementar la resiliencia de los cultivos frente a escenarios de creciente incertidumbre.

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura complementa esta perspectiva al señalar que la adaptación climática requiere fortalecer simultáneamente las capacidades técnicas de los productores, el acceso a tecnologías de monitoreo y la disponibilidad de información climática que facilite la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua (IICA, 2021). En este sentido, la innovación tecnológica debe acompañarse de procesos permanentes de capacitación y transferencia de conocimientos que permitan aprovechar plenamente el potencial de las nuevas herramientas digitales aplicadas a la agricultura.

Asimismo, Abedinpour y Sarangi (2018) sostienen que la eficiencia hídrica debe evaluarse considerando escenarios climáticos futuros y no únicamente las condiciones actuales, ya que numerosos sistemas de riego diseñados bajo parámetros históricos podrían perder efectividad debido al incremento de la demanda evaporativa y a las modificaciones previstas en la disponibilidad del recurso. Esta perspectiva ha impulsado el desarrollo de infraestructuras hidráulicas más flexibles y adaptativas, capaces de responder a escenarios climáticos cambiantes y garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola durante las próximas décadas. En conjunto, la agricultura climáticamente inteligente representa una evolución conceptual que integra tecnología, manejo agronómico, planificación territorial y fortalecimiento institucional dentro de un mismo modelo de gestión sostenible del agua.

Estrategias de conservación del agua en condiciones de sequía

Las sequías representan uno de los fenómenos climáticos que mayor impacto ejercen sobre la productividad agrícola y la disponibilidad de recursos hídricos, constituyéndose en uno de los principales desafíos para la sostenibilidad de los sistemas de producción. El incremento en la frecuencia, duración e intensidad de estos eventos, asociado al cambio climático, ha impulsado el desarrollo de numerosas investigaciones orientadas a identificar estrategias capaces de conservar el agua disponible y minimizar los efectos del déficit hídrico sobre los cultivos. Como resultado, la gestión del agua durante periodos de sequía ha evolucionado desde un enfoque centrado exclusivamente en incrementar la eficiencia de los sistemas de riego hacia modelos integrales que incorporan prácticas de conservación del suelo, manejo agronómico, monitoreo climático y tecnologías de apoyo a la toma de decisiones (FAO, 2020).

La evidencia científica demuestra que la conservación del agua no depende únicamente del método de irrigación empleado, sino también de la capacidad del suelo para almacenar y suministrar humedad durante el desarrollo del cultivo. Kader et al. (2017) señalan que prácticas como el establecimiento de coberturas vegetales, la incorporación de residuos orgánicos, la reducción del laboreo y el incremento del contenido de materia orgánica favorecen una disminución significativa de las pérdidas de agua por evaporación y mejoran la capacidad de retención hídrica del suelo. Estas estrategias permiten mantener condiciones más estables para el desarrollo radicular, incrementando la disponibilidad de agua durante periodos prolongados de escasez y reduciendo la vulnerabilidad de los cultivos frente al estrés hídrico.

De manera complementaria, el manejo eficiente del riego ha evolucionado mediante la incorporación de estrategias orientadas a optimizar la utilización del recurso sin comprometer significativamente el rendimiento agrícola. En este contexto, Steduto et al. (2012) desarrollaron modelos que demuestran la viabilidad del riego deficitario controlado como una alternativa para regiones con limitada disponibilidad de agua. Sus investigaciones evidencian que, cuando el déficit hídrico se aplica de forma planificada y considerando las etapas fenológicas más sensibles del cultivo, es posible reducir el consumo de agua manteniendo niveles aceptables de productividad. Este enfoque representa un cambio importante respecto a las estrategias tradicionales de irrigación, ya que prioriza la asignación eficiente del recurso sobre la aplicación uniforme de agua durante todo el ciclo productivo.

Las estrategias de conservación adquieren mayor efectividad cuando se integran con herramientas de monitoreo climático y tecnologías de agricultura de precisión. La FAO (2020) destaca que la utilización de sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y modelos predictivos permite ajustar continuamente la programación del riego de acuerdo con las condiciones ambientales predominantes, evitando aplicaciones innecesarias y reduciendo las pérdidas de agua. Esta integración tecnológica fortalece la capacidad de respuesta frente a escenarios de sequía y favorece una utilización mucho más racional de los recursos hídricos disponibles.

En conjunto, la literatura científica evidencia que la gestión del agua durante periodos de sequía requiere un enfoque multidimensional que combine innovación tecnológica, manejo sostenible del suelo, planificación agronómica y monitoreo ambiental. La complementariedad entre estas estrategias incrementa la eficiencia del uso del agua, fortalece la resiliencia de los sistemas agrícolas y contribuye a mantener la productividad en contextos caracterizados por una creciente escasez hídrica. Más que responder únicamente a situaciones de emergencia, las investigaciones actuales promueven la construcción de sistemas agrícolas preparados para convivir con condiciones climáticas cada vez más variables e inciertas.

Resiliencia de los sistemas agrícolas frente al estrés hídrico

El concepto de resiliencia ha adquirido una importancia creciente dentro de la investigación sobre gestión eficiente del agua, debido a la necesidad de desarrollar sistemas agrícolas capaces de mantener su funcionamiento frente a condiciones ambientales cada vez más impredecibles. A diferencia de las primeras aproximaciones, centradas principalmente en mejorar la eficiencia hidráulica de los sistemas de riego, la literatura contemporánea incorpora una visión más amplia que considera la capacidad de los agroecosistemas para anticipar, adaptarse y recuperarse de eventos de estrés hídrico sin comprometer su productividad ni la sostenibilidad de los recursos naturales (FAO, 2020).

Bajo esta perspectiva, la gestión del agua deja de ser una actividad exclusivamente técnica para convertirse en un elemento estratégico dentro de la adaptación agrícola al cambio climático.

La resiliencia hídrica depende de múltiples factores que interactúan de manera simultánea dentro de los sistemas agrícolas. Molden (2007) sostiene que la disponibilidad de infraestructura de riego, el acceso a fuentes de agua superficiales y subterráneas, la eficiencia en el manejo agronómico y la capacidad institucional para responder a situaciones de escasez constituyen componentes fundamentales para fortalecer la adaptación de la agricultura frente a eventos climáticos extremos. Esta visión sistémica pone de manifiesto que la eficiencia del uso del agua representa solo uno de los elementos necesarios para construir sistemas resilientes, siendo igualmente importantes la planificación territorial, la gobernanza del agua y la conservación de los ecosistemas que sustentan la disponibilidad del recurso.

En los últimos años, la resiliencia agrícola también ha sido fortalecida mediante la incorporación de tecnologías digitales capaces de mejorar la capacidad de anticipación y respuesta frente al estrés hídrico. La FAO (2022) y el IICA (2021) coinciden en señalar que la integración de sensores inteligentes, plataformas de monitoreo ambiental, sistemas de información geográfica, imágenes satelitales e inteligencia artificial permite identificar tempranamente situaciones de riesgo, optimizar la programación del riego y reducir la incertidumbre asociada a la toma de decisiones. Estas herramientas facilitan una gestión más dinámica del agua y contribuyen a incrementar la capacidad adaptativa de los productores frente a escenarios climáticos altamente variables.

No obstante, la literatura científica también reconoce que la resiliencia no depende exclusivamente del acceso a tecnologías avanzadas. El fortalecimiento de las capacidades técnicas de los agricultores, el desarrollo de políticas públicas orientadas a la gestión sostenible del agua, la cooperación institucional y la planificación integrada del territorio constituyen factores igualmente determinantes para garantizar la adaptación de los sistemas agrícolas frente a los efectos del cambio climático (FAO, 2020). En consecuencia, las investigaciones actuales promueven enfoques interdisciplinarios donde la innovación tecnológica se complementa con estrategias sociales, económicas e institucionales orientadas a fortalecer la sostenibilidad del sector agrícola.

En síntesis, la evidencia científica demuestra que la adaptación al cambio climático exige superar los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la eficiencia hidráulica para avanzar hacia modelos integrales de gestión que articulen innovación tecnológica, planificación territorial, conservación ambiental, fortalecimiento institucional y participación de los productores. Este cambio representa una de las principales tendencias de la investigación contemporánea sobre recursos hídricos aplicados a la agricultura y refleja la transición hacia sistemas agrícolas más resilientes, sostenibles y preparados para enfrentar los desafíos asociados con la creciente incertidumbre climática.

REUTILIZACIÓN DEL AGUA Y ECONOMÍA CIRCULAR EN LA AGRICULTURA

La creciente presión sobre los recursos hídricos ha impulsado el desarrollo de estrategias orientadas a diversificar las fuentes de abastecimiento de agua para la agricultura, situando la reutilización de aguas residuales tratadas como una de las alternativas más prometedoras para fortalecer la seguridad hídrica y avanzar hacia modelos de producción más sostenibles. En este contexto, el concepto de economía circular ha adquirido una relevancia creciente al promover el aprovechamiento eficiente de recursos que tradicionalmente eran considerados residuos, favoreciendo su reincorporación dentro de los procesos productivos mediante esquemas que reducen el consumo de agua dulce y disminuyen el impacto ambiental asociado a la descarga de efluentes (Qadir et al., 2010). Como resultado, la reutilización del agua ha dejado de concebirse únicamente como una solución frente a la escasez hídrica para convertirse en un componente estratégico de la gestión integrada de los recursos naturales y de la transición hacia sistemas agrícolas más resilientes.

La evolución de esta práctica refleja un importante cambio conceptual dentro de la investigación sobre recursos hídricos. Durante las primeras etapas, la atención científica se concentró principalmente en evaluar los riesgos sanitarios derivados del uso agrícola de aguas residuales, especialmente aquellos relacionados con la transmisión de microorganismos patógenos, metales pesados y otros contaminantes que podían comprometer la salud humana y la

calidad ambiental. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías más eficientes de tratamiento, desinfección y monitoreo de la calidad del agua ha permitido desplazar progresivamente el debate hacia el aprovechamiento seguro de este recurso, integrando criterios de gestión ambiental, eficiencia hídrica y sostenibilidad productiva (Qadir et al., 2010). Esta evolución ha favorecido la consolidación de programas de reutilización que incorporan protocolos técnicos cada vez más rigurosos y sistemas permanentes de vigilancia para garantizar la inocuidad del agua destinada al riego.

Diversas investigaciones coinciden en señalar que la reutilización de aguas tratadas genera beneficios que trascienden el incremento de la disponibilidad del recurso. Qadir et al. (2010) destacan que esta estrategia contribuye simultáneamente a disminuir la presión sobre fuentes convencionales de abastecimiento, reducir la extracción de aguas superficiales y subterráneas, optimizar la gestión de los efluentes urbanos y fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a escenarios de creciente escasez hídrica. Además, en determinados contextos, las aguas residuales tratadas conservan concentraciones aprovechables de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que puede reducir parcialmente la necesidad de fertilización química y favorecer una utilización más eficiente de los recursos disponibles. Desde esta perspectiva, la reutilización del agua constituye uno de los ejemplos más representativos de los principios de la economía circular aplicados al sector agropecuario.

No obstante, la expansión de estas prácticas exige garantizar elevados estándares de calidad y seguridad sanitaria. Qadir et al. (2010) señalan que el uso agrícola de aguas residuales debe sustentarse en procesos de tratamiento adecuados, monitoreo microbiológico continuo, evaluación de contaminantes emergentes y programas permanentes de control que aseguren la protección de la salud pública, la calidad de los suelos y la inocuidad de los productos agrícolas. Estas exigencias adquieren especial relevancia debido a la creciente presencia de compuestos farmacéuticos, residuos industriales y otros contaminantes cuya acumulación podría representar riesgos ambientales a largo plazo si no se establecen mecanismos eficaces de control y seguimiento.

A pesar del importante potencial que ofrece esta estrategia, la literatura científica reconoce que su implementación continúa enfrentando desafíos técnicos, económicos e institucionales que limitan su adopción a gran escala. Qadir et al. (2010) señalan que la construcción y el mantenimiento de infraestructura especializada para el tratamiento del agua, junto con los elevados costos asociados a su operación, representan algunos de los principales obstáculos para ampliar el uso agrícola de aguas residuales tratadas. A estos desafíos se suma la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y consolidar mecanismos permanentes de monitoreo de la calidad del recurso, aspectos que Qadir et al. (2010) consideran indispensables para garantizar la seguridad sanitaria, la protección ambiental y la confianza de productores y consumidores. En consecuencia, la evidencia disponible sugiere que la consolidación de la reutilización del agua dentro de la agricultura dependerá no solo del avance tecnológico, sino también de la capacidad para integrar políticas públicas, innovación científica, educación ambiental y una gobernanza eficiente de los recursos hídricos dentro de una estrategia integral de economía circular.

LIMITACIONES Y DESAFÍOS PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

A pesar de los importantes avances registrados durante las últimas décadas en materia de modernización del riego, digitalización de la agricultura y gestión integrada de los recursos hídricos, la implementación de estrategias orientadas a optimizar el uso del agua continúa enfrentando importantes limitaciones de carácter técnico, económico, institucional, ambiental y social. La FAO (2022) destaca que las innovaciones tecnológicas desarrolladas para incrementar la productividad hídrica aún presentan una adopción desigual entre regiones, debido a diferencias en el acceso a infraestructura, financiamiento y asistencia técnica. En la misma línea, el IICA (2021) señala que estas brechas tecnológicas limitan la transferencia efectiva del conocimiento hacia los sistemas agrícolas comerciales, especialmente entre pequeños y medianos productores, dificultando la consolidación de modelos sostenibles de gestión del agua. Esta realidad pone de manifiesto que el acceso a la tecnología constituye únicamente uno de los múltiples factores que condicionan el éxito de las políticas orientadas a mejorar la eficiencia hídrica.

Uno de los principales consensos identificados en la literatura es que la eficiencia del uso del agua depende de la interacción simultánea entre múltiples componentes que conforman el sistema agrícola. Más allá de las características

técnicas de los métodos de riego, variables como la infraestructura hidráulica disponible, las condiciones climáticas, las propiedades físicas del suelo, el manejo agronómico, la disponibilidad de información confiable y la capacidad institucional para apoyar a los productores determinan conjuntamente el desempeño de las estrategias de gestión hídrica. Abedinpour y Sarangi (2018) destacan que esta complejidad explica por qué tecnologías altamente eficientes bajo determinadas condiciones pueden presentar resultados considerablemente diferentes cuando son transferidas a contextos ambientales, económicos o sociales distintos. Esta evidencia demuestra que las soluciones tecnológicas deben adaptarse a las particularidades biofísicas y socioeconómicas de cada territorio para alcanzar resultados sostenibles en el largo plazo.

Las restricciones económicas constituyen otro de los principales desafíos para la modernización de la gestión del agua. La FAO (2022) señala que la incorporación de sistemas de riego presurizado, sensores inteligentes, plataformas digitales, estaciones meteorológicas automatizadas y herramientas basadas en inteligencia artificial requiere inversiones iniciales que frecuentemente superan la capacidad financiera de pequeños y medianos productores. Además, el mantenimiento de estas tecnologías depende de la disponibilidad de conectividad digital, servicios especializados y programas permanentes de capacitación, condiciones que continúan siendo limitadas en numerosas regiones agrícolas. Como consecuencia, la velocidad de adopción de las innovaciones permanece condicionada no solo por los costos de adquisición, sino también por la existencia de infraestructura tecnológica y capacidades locales que permitan garantizar su funcionamiento adecuado.

A estas restricciones económicas se suman importantes desafíos relacionados con la gobernanza del agua y el fortalecimiento institucional. El IICA (2021) sostiene que la gestión eficiente de los recursos hídricos requiere marcos regulatorios sólidos, mecanismos efectivos de coordinación entre instituciones y políticas públicas capaces de integrar los intereses de los diferentes sectores usuarios del agua. La fragmentación institucional, la limitada disponibilidad de información hidrológica y las debilidades en los procesos de planificación dificultan la implementación de estrategias coordinadas que permitan equilibrar la productividad agrícola con la conservación de los ecosistemas. En consecuencia, la eficiencia hídrica depende tanto de la innovación tecnológica como de la capacidad institucional para diseñar, implementar y evaluar políticas de gestión adaptadas a las características de cada territorio.

El cambio climático incorpora un nivel adicional de complejidad que incrementa la incertidumbre en la planificación de los recursos hídricos. La FAO (2020) advierte que las modificaciones en los patrones de precipitación, el aumento sostenido de la temperatura y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos obligan a desarrollar sistemas de gestión mucho más flexibles y adaptativos que los implementados históricamente. En concordancia con esta perspectiva, Molden (2007) sostiene que la sostenibilidad futura de la agricultura dependerá de la capacidad para integrar innovación tecnológica, monitoreo ambiental, planificación territorial y fortalecimiento institucional dentro de modelos de gestión capaces de responder dinámicamente a escenarios climáticos cada vez más variables. Esta visión refleja una de las principales tendencias de la investigación contemporánea, donde el desafío ya no consiste únicamente en incrementar la eficiencia del uso del agua, sino en construir sistemas agrícolas inteligentes, resilientes y sostenibles que garanticen simultáneamente la seguridad hídrica, la productividad y la conservación de los recursos naturales.

Variabilidad climática e incertidumbre en la planificación del riego

La creciente variabilidad climática constituye uno de los principales factores que condicionan la planificación eficiente del riego en la agricultura contemporánea. Las modificaciones observadas en los patrones de precipitación, el incremento sostenido de la temperatura y la mayor frecuencia de eventos extremos han reducido la capacidad predictiva de los métodos tradicionales utilizados para estimar la disponibilidad de agua y programar las aplicaciones de riego. La FAO (2020) señala que estos cambios incrementan la incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos y obligan a sustituir los esquemas de planificación basados exclusivamente en registros históricos por sistemas dinámicos capaces de incorporar información climática actualizada y escenarios futuros.

Esta transformación resulta especialmente relevante debido a que una gran parte de la infraestructura hidráulica y de los programas de riego actualmente en funcionamiento fueron diseñados considerando condiciones climáticas considerablemente diferentes a las que predominan en la actualidad. Abedinpour y Sarangi (2018) destacan que el incremento de la evapotranspiración y las alteraciones en la distribución temporal de las precipitaciones modifican los requerimientos hídricos de los cultivos, reduciendo la eficacia de los modelos convencionales de programación del riego. Como consecuencia, la gestión eficiente del agua requiere incorporar herramientas predictivas capaces de responder continuamente a las variaciones ambientales que caracterizan los escenarios agrícolas actuales.

Frente a esta realidad, las investigaciones recientes promueven la integración de estaciones meteorológicas automatizadas, sensores ambientales, pronósticos climáticos y modelos de simulación dentro de los sistemas de apoyo a la decisión. La FAO (2020) sostiene que estas herramientas permiten ajustar dinámicamente la programación del riego conforme evolucionan las condiciones meteorológicas, disminuyendo el riesgo de déficit hídrico o de aplicaciones excesivas de agua. No obstante, la adopción de estas tecnologías continúa siendo limitada en numerosos territorios debido a deficiencias en infraestructura digital, disponibilidad de información climática y acceso a servicios técnicos especializados.

En conjunto, la literatura científica evidencia que la incertidumbre climática ha dejado de constituir una condición excepcional para convertirse en un componente permanente de la planificación agrícola. Este escenario exige desarrollar sistemas de gestión del agua cada vez más flexibles, predictivos y adaptativos, capaces de responder oportunamente a condiciones ambientales altamente variables y de fortalecer la resiliencia de la producción agrícola frente al cambio climático.

Limitaciones económicas y acceso desigual a la tecnología

Uno de los desafíos más ampliamente documentados en la literatura científica corresponde a la brecha existente entre la disponibilidad de tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia hídrica y la capacidad real de los productores para incorporarlas dentro de sus sistemas de producción. Durante las últimas décadas se ha desarrollado una amplia variedad de innovaciones, entre ellas sistemas automatizados de riego, sensores inteligentes, plataformas digitales, agricultura de precisión e inteligencia artificial, que han demostrado importantes beneficios en la optimización del uso del agua. Sin embargo, la FAO (2022) advierte que estas tecnologías continúan concentrándose principalmente en explotaciones agrícolas con mayor capacidad económica y acceso a infraestructura tecnológica, generando importantes desigualdades en los niveles de modernización alcanzados.

Las limitaciones económicas representan uno de los principales factores que explican esta situación. El IICA (2021) señala que pequeños y medianos productores enfrentan dificultades relacionadas con los elevados costos iniciales de inversión, el mantenimiento de los equipos, la actualización tecnológica y el acceso a servicios especializados de asistencia técnica. Estas restricciones limitan la incorporación de innovaciones que podrían incrementar significativamente la eficiencia del uso del agua, especialmente en países donde predominan sistemas agrícolas familiares y explotaciones de pequeña escala.

A estas dificultades se suman las limitaciones derivadas de la infraestructura tecnológica disponible en las zonas rurales. Kamienski et al. (2019) destacan que el funcionamiento de la agricultura digital depende de la existencia de conectividad estable, redes de telecomunicaciones, suministro confiable de energía eléctrica y plataformas de procesamiento de datos, condiciones que aún presentan importantes deficiencias en numerosos territorios agrícolas. Como consecuencia, la brecha tecnológica no solo responde a diferencias económicas, sino también a desigualdades en el acceso a infraestructura básica que permita operar eficientemente las nuevas herramientas digitales.

La evidencia científica coincide en señalar que la reducción de estas desigualdades requiere políticas públicas integrales orientadas a democratizar el acceso a la innovación tecnológica. Programas de financiamiento, incentivos para la modernización agrícola, fortalecimiento de los servicios de extensión rural y capacitación permanente de los productores constituyen estrategias fundamentales para acelerar la adopción de tecnologías eficientes y favorecer una gestión más equitativa y sostenible de los recursos hídricos.

Infraestructura hidráulica y pérdidas en la distribución del agua

Aunque la investigación reciente ha concentrado una parte importante de sus esfuerzos en el desarrollo de tecnologías digitales y sistemas inteligentes de programación del riego, la literatura continúa reconociendo que la infraestructura hidráulica constituye uno de los componentes fundamentales para alcanzar una gestión eficiente del agua. La modernización tecnológica pierde gran parte de su efectividad cuando el recurso se transporta mediante canales deteriorados, redes de distribución obsoletas o sistemas hidráulicos que presentan elevados niveles de pérdida antes de llegar a las parcelas agrícolas. Bos et al. (2005) demostraron que una proporción importante del agua destinada al riego continúa perdiéndose durante las etapas de conducción y distribución debido a deficiencias estructurales y a un mantenimiento insuficiente de la infraestructura existente.

La eficiencia global de los sistemas de riego depende, por tanto, de la interacción entre infraestructura física y tecnologías de gestión. Playán y Mateos (2006) sostienen que la incorporación de automatización, sensores o plataformas digitales solo produce resultados significativos cuando el sistema hidráulico garantiza una distribución uniforme del agua y mantiene adecuados niveles de regulación y control. En ausencia de estas condiciones, las innovaciones tecnológicas tienen un impacto limitado sobre la productividad hídrica, ya que las pérdidas estructurales continúan representando una proporción considerable del recurso disponible.

En este sentido, la FAO (2022) advierte que numerosos programas de modernización agrícola han privilegiado la adquisición de tecnologías avanzadas sin destinar inversiones equivalentes a la rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura básica de distribución del agua. Esta situación reduce la eficiencia integral de los sistemas de riego y limita el retorno de las inversiones realizadas en innovación tecnológica.

En consecuencia, la literatura científica coincide en que la modernización de la infraestructura hidráulica debe constituir un componente prioritario dentro de las estrategias de gestión eficiente del agua. La combinación de redes de distribución eficientes con tecnologías inteligentes de monitoreo y automatización representa una condición indispensable para maximizar la productividad hídrica y garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, especialmente en regiones donde la obsolescencia de la infraestructura continúa siendo una de las principales fuentes de pérdida del recurso.

Gobernanza del agua y fortalecimiento institucional

La investigación contemporánea reconoce que los desafíos asociados con la gestión eficiente del agua trascienden ampliamente las dimensiones tecnológicas y requieren fortalecer los mecanismos institucionales encargados de planificar, regular y coordinar el aprovechamiento del recurso hídrico. La disponibilidad de tecnologías avanzadas no garantiza por sí sola una utilización sostenible del agua cuando existen debilidades en los sistemas de gobernanza, ausencia de coordinación entre instituciones o marcos regulatorios insuficientes para responder a los nuevos desafíos ambientales. La FAO (2020) destaca que una gestión eficaz del agua depende de procesos institucionales sólidos que permitan articular políticas públicas, planificación territorial y participación de los diferentes actores involucrados.

Desde una perspectiva integral, Molden (2007) plantea que la asignación eficiente del recurso hídrico requiere mecanismos de coordinación capaces de equilibrar las necesidades de los distintos usuarios, prevenir conflictos por el acceso al agua y proteger simultáneamente los ecosistemas que garantizan su disponibilidad futura. Esta visión incorpora la gobernanza como un componente esencial de la sostenibilidad hídrica, superando los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la infraestructura y la eficiencia técnica.

La dimensión participativa también adquiere una importancia creciente dentro de los modelos actuales de gestión. El IICA (2021) sostiene que la construcción de políticas efectivas requiere la participación activa de productores, organizaciones comunitarias, instituciones públicas y organismos técnicos, favoreciendo procesos de toma de decisiones adaptados a las características ambientales, sociales y económicas de cada territorio. Asimismo, destaca que la capacitación permanente de los usuarios constituye un elemento indispensable para fortalecer la adopción de prácticas sostenibles y mejorar el aprovechamiento de las tecnologías disponibles.

En un escenario caracterizado por el cambio climático, el crecimiento demográfico y el incremento de la demanda de agua, la FAO (2020) considera que los sistemas de gobernanza deberán incorporar mecanismos cada vez más flexibles que permitan adaptar continuamente las estrategias de gestión conforme evolucionen las condiciones hidrológicas y socioeconómicas. En consecuencia, la literatura científica coincide en que la sostenibilidad futura de la gestión hídrica dependerá tanto del avance tecnológico como del fortalecimiento institucional, la participación social y la capacidad de coordinación entre los múltiples actores responsables del manejo del agua.

Síntesis crítica de las limitaciones identificadas en la literatura

El análisis conjunto de la evidencia científica demuestra que las limitaciones para alcanzar una gestión eficiente del agua en la agricultura responden a la interacción de factores ambientales, tecnológicos, económicos, institucionales y sociales que actúan simultáneamente sobre los sistemas productivos. Molden (2007) plantea que la sostenibilidad de la gestión hídrica depende de la articulación entre la disponibilidad del recurso, la infraestructura, el manejo agronómico y los mecanismos institucionales responsables de su administración. Esta perspectiva coincide con los planteamientos de Abedinpour y Sarangi (2018), quienes sostienen que la creciente variabilidad climática obliga a replantear los modelos tradicionales de gestión del agua mediante estrategias más flexibles y adaptativas, capaces de responder a escenarios caracterizados por una elevada incertidumbre ambiental.

Más allá del desarrollo tecnológico alcanzado durante las últimas décadas, la literatura revisada muestra un consenso creciente respecto a que el futuro de la gestión eficiente del agua dependerá de la integración de múltiples dimensiones dentro de un mismo modelo de planificación. La FAO (2022) destaca que la modernización de la infraestructura hidráulica y la incorporación de tecnologías digitales deben complementarse con procesos permanentes de capacitación, fortalecimiento institucional y acceso equitativo a la innovación. De manera complementaria, el IICA (2021) enfatiza que la planificación territorial y la participación de los diferentes actores involucrados en la gestión del recurso constituyen elementos indispensables para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Asimismo, la literatura coincide en que la eficiencia del uso del agua debe evaluarse mediante indicadores que integren simultáneamente la productividad agrícola, la sostenibilidad ambiental, la resiliencia de los agroecosistemas y la seguridad hídrica frente al cambio climático.

En consecuencia, las limitaciones identificadas por la literatura no deben interpretarse únicamente como obstáculos para la gestión del agua, sino también como oportunidades para orientar nuevas líneas de investigación y fortalecer el diseño de políticas públicas. La FAO (2020) señala que la construcción de sistemas agrícolas resilientes requerirá integrar innovación tecnológica, gobernanza eficiente, planificación adaptativa y conservación de los recursos naturales dentro de estrategias de largo plazo. Bajo esta perspectiva, el desafío ya no consiste únicamente en incrementar la eficiencia del riego, sino en consolidar modelos de gestión capaces de garantizar simultáneamente la seguridad hídrica, la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos.

PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS

La evolución reciente de la investigación científica indica que la gestión eficiente del agua continuará transformándose a partir de la integración entre innovación tecnológica, digitalización de la agricultura y estrategias orientadas a fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos. En los últimos años, Kamienski et al. (2019) destacan que los avances tecnológicos han permitido superar los sistemas convencionales de automatización para evolucionar hacia plataformas inteligentes capaces de integrar información procedente de sensores, imágenes satelitales, estaciones meteorológicas, modelos de simulación e inteligencia artificial. Esta convergencia tecnológica favorece procesos de toma de decisiones basados en información obtenida en tiempo real, incrementando la precisión de la programación del riego y optimizando simultáneamente la productividad agrícola y el uso del recurso hídrico.

Uno de los campos con mayor potencial de desarrollo corresponde a la aplicación de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para la gestión del agua. La FAO (2020) señala que estas herramientas permitirán procesar

grandes volúmenes de información relacionados con las características del suelo, las condiciones climáticas, el comportamiento fisiológico de los cultivos y la disponibilidad de agua, generando modelos predictivos capaces de anticipar escenarios de déficit hídrico y optimizar la distribución del recurso con niveles de precisión cada vez mayores. La incorporación progresiva de estas tecnologías favorecerá la transición hacia sistemas agrícolas altamente automatizados, capaces de responder dinámicamente a condiciones ambientales cambiantes.

Otra línea de investigación que adquiere creciente relevancia está relacionada con el fortalecimiento de la reutilización segura del agua dentro de esquemas de economía circular. Qadir et al. (2010) sostienen que el perfeccionamiento de las tecnologías de tratamiento, acompañado por sistemas permanentes de monitoreo de la calidad del agua y marcos regulatorios robustos, permitirá ampliar la utilización de fuentes alternativas para el riego agrícola. Esta perspectiva no solo contribuirá a reducir la presión sobre los recursos hídricos convencionales, sino que favorecerá modelos de producción más sostenibles mediante el aprovechamiento eficiente de recursos previamente considerados residuos. La literatura también muestra una tendencia creciente hacia enfoques que integran la gestión del agua con la conservación del suelo, la restauración de ecosistemas y la planificación territorial. La FAO (2022) reconoce que la eficiencia hídrica depende del funcionamiento integral de los agroecosistemas y no exclusivamente del volumen de agua aplicado durante el riego. En consecuencia, las futuras investigaciones orientan sus esfuerzos hacia modelos de gestión capaces de armonizar productividad agrícola, conservación ambiental y adaptación al cambio climático mediante estrategias interdisciplinarias que fortalezcan simultáneamente la resiliencia de los sistemas productivos. En conjunto, las perspectivas identificadas reflejan una transición hacia modelos de agricultura digital, resiliente y climáticamente inteligente, donde la gestión eficiente del agua dejará de entenderse como una actividad exclusivamente técnica para consolidarse como un componente estratégico de la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo rural. La capacidad para integrar innovación tecnológica, fortalecimiento institucional, planificación territorial y gobernanza de los recursos hídricos constituirá uno de los principales factores que determinarán la sostenibilidad de la agricultura durante las próximas décadas.

3. CONCLUSIÓN

La presente revisión evidencia que la gestión eficiente del agua en los sistemas agrícolas ha experimentado una profunda evolución conceptual, pasando de enfoques centrados principalmente en la eficiencia hidráulica y la ampliación de la infraestructura de riego hacia modelos integrales donde la productividad del agua, la sostenibilidad ambiental, la resiliencia climática y la innovación tecnológica constituyen dimensiones inseparables de la planificación agrícola. Esta transformación refleja un cambio de paradigma en la forma de comprender el recurso hídrico, que actualmente es reconocido no solo como un insumo esencial para la producción, sino como un elemento estratégico para garantizar la seguridad alimentaria, la conservación de los ecosistemas y el desarrollo sostenible.

La revisión también demuestra que la evolución de los indicadores utilizados para evaluar la eficiencia del uso del agua ha permitido superar las limitaciones de los enfoques tradicionales basados exclusivamente en criterios hidráulicos. La incorporación de conceptos como productividad hídrica, eficiencia del uso del agua y gestión integrada de los recursos hídricos ha favorecido evaluaciones multidimensionales que consideran simultáneamente aspectos agronómicos, económicos, energéticos, ambientales e institucionales, proporcionando una visión mucho más completa del desempeño de los sistemas agrícolas y de los factores que condicionan su sostenibilidad.

Asimismo, la evidencia científica confirma que la transformación tecnológica representa uno de los principales motores del cambio en la gestión del agua. La integración de sensores inteligentes, agricultura de precisión, Internet de las Cosas, teledetección, inteligencia artificial y plataformas de apoyo a la toma de decisiones ha incrementado significativamente la capacidad para optimizar la programación del riego mediante información obtenida en tiempo real. Sin embargo, esta revisión pone de manifiesto que el impacto de estas innovaciones depende de su adecuada articulación con infraestructura hidráulica eficiente, procesos permanentes de capacitación, acceso equitativo a la tecnología y sistemas institucionales capaces de respaldar su implementación.

Otro hallazgo relevante corresponde al creciente papel que desempeña la gestión del agua dentro de las estrategias de adaptación al cambio climático. La creciente variabilidad de las condiciones ambientales exige sustituir los

esquemas tradicionales de planificación por modelos dinámicos capaces de incorporar información climática, monitoreo ambiental, análisis predictivo y planificación integrada de los recursos hídricos. En este contexto, la agricultura climáticamente inteligente, la reutilización segura del agua, la conservación del suelo y el fortalecimiento de la resiliencia de los agroecosistemas emergen como componentes fundamentales para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola frente a escenarios caracterizados por una disponibilidad hídrica cada vez más incierta.

La revisión también identifica que los principales desafíos para la gestión eficiente del agua trascienden el ámbito tecnológico. La persistencia de limitaciones económicas, desigualdades en el acceso a infraestructura, debilidades institucionales, deficiencias en los mecanismos de gobernanza y diferencias en la capacidad técnica de los productores condicionan significativamente la adopción de innovaciones orientadas a mejorar la eficiencia hídrica. En consecuencia, la sostenibilidad futura de los sistemas agrícolas dependerá de la capacidad para integrar políticas públicas, planificación territorial, fortalecimiento institucional, innovación tecnológica y participación activa de los diferentes actores involucrados en la gestión del recurso.

Finalmente, la evidencia analizada permite concluir que el futuro de la gestión eficiente del agua estará determinado por la convergencia entre agricultura digital, inteligencia artificial, monitoreo ambiental, economía circular y estrategias de adaptación al cambio climático. La integración de estas herramientas permitirá avanzar hacia sistemas agrícolas más inteligentes, resilientes y sostenibles, capaces de optimizar el uso del recurso hídrico sin comprometer la productividad ni la disponibilidad futura del agua. En este escenario, las investigaciones venideras deberán orientarse no solo al desarrollo de nuevas tecnologías, sino también a fortalecer los mecanismos que faciliten su adopción, ampliar el acceso de los productores a la innovación y consolidar modelos de gestión adaptativos que respondan de manera eficaz a los desafíos ambientales, sociales y productivos que enfrentará la agricultura durante el siglo XXI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedinpour, M., & Sarangi, A. (2018). Water productivity and irrigation efficiency in agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 204, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.013>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- Bastiaanssen, W. G. M., Steduto, P., Hobbins, M., & Anderson, M. (2020). Evapotranspiration and water productivity in agricultural systems. *Agricultural Water Management*, 240, 106267. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106267>
- Bos, M. G., Burton, M. A., & Molden, D. (Eds.). (2005). Irrigation and drainage performance assessment: Practical guidelines. CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851999678.0000>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281–289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2021). Gestión y manejo del agua en la agricultura. <https://iica.int/>

- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>
- Kamienski, C., Soininen, J.-P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T. S., Maia, R. F., & Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. <https://doi.org/10.3390/s19020276>
- Molden, D. (Ed.). (2007). *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. Earthscan. <https://www.iwmi.cgiar.org/assessment/>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Playán, E., & Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.004>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

José Luis Zúñiga Pincay (JLZP)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (JLZP)

Curación de datos: (JLZP)

Análisis formal: (JLZP)

Zúñiga Pincay

Adquisición de fondos: (JLZP)

Investigación: (JLZP)

Metodología: (JLZP)

Administración del proyecto: (JLZP)

Recursos: No Aplica

Software: (JLZP)

Supervisión: (JLZP)

Validación: (JLZP)

Visualización: (JLZP)

Redacción – Borrador original: (JLZP)

Redacción – Revisión y edición: (JLZP)