



Revisión de Literatura en Eficiencia Energética para Sistemas de Riego 2011-2023

María del Mar García Vásquez

Natalia Andrea Silva Arrubla

Docente

Carlos Andrés Trujillo Suarez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Eficiencia Energética
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(García & Silva, 2023)
Referencia	García Vásquez, M. M. & Silva Arrubla, N. A. (2023). <i>Revisión de Literatura en Eficiencia Energética para Sistemas de Riego 2011 - 2023</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Eficiencia Energética, Cohorte II.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
1. Planteamiento del problema	11
1.1 Pregunta de investigación.....	11
2. Justificación.....	12
3. Objetivos	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos.....	13
4. Metodología utilizada.....	14
5. Discusión y resultados.....	19
Referencias	37

Lista de tablas

Tabla 1 Bibliografía seleccionada 15

Resumen

Teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos los impactos económicos y ambientales, se evidencia la importancia de la implementación de medidas para la mejora de eficiencia en las actividades de riego para cultivo. Se realizó una revisión bibliográfica en la cual se buscaba identificar medidas estudiadas o implementadas a nivel mundial. Esta se hizo a través de bases de datos electrónicas, filtrando la información relevante y agrupando según el tipo de medida de eficiencia estudiada, entre ellos, la utilización de energía renovables, la modernización de los sistemas, la implementación de mejoras con sistemas de riego inteligentes, encontrando que en la mayoría de casos, se pueden implementar medidas de mejora, como cambios en la tecnología, automatización de riego, combinación de sistemas con fuentes renovables, cada uno dependiente de las necesidades particulares, los recursos disponibles, como el clima, tipo de cultivo, la topografía, tipo de suelo y solvencia económica.

Palabras clave: revisión bibliográfica, eficiencia energética, sistemas de riego, energías renovables.

Abstract

Considering the availability of resources and the economic and environmental impacts, the importance of implementing measures to improve efficiency in irrigation activities for cultivation is evident. A literature review was conducted to identify measures studied or implemented worldwide. This was done through electronic databases, filtering relevant information and grouping it according to the type of efficiency measure studied. These measures include the use of renewable energy, the modernization of systems, and the implementation of improvements with smart irrigation systems. It was found that in most cases, improvement measures can be implemented, such as changes in technology, automation of irrigation, and the integration of systems with renewable sources. The choice of these measures depends on specific needs, available resources such as climate, crop type, topography, soil type, and economic solvency.

Keywords: literature review, energy efficiency, irrigation systems, renewable energy.

Introducción

Los sistemas de riego en el mundo son de gran importancia para la agricultura, con especial énfasis en su contribución a aspectos como la eficiencia en el uso del agua, el aumento de la productividad y la sostenibilidad de la agricultura.

De acuerdo con el informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (UN, 2023), los principales sectores con mayor demanda en el uso de agua son los municipios, la industrias y la agricultura. Se estima que la demanda mundial de agua seguirá aumentando aproximadamente un 1% cada año debido a diversos factores como el aumento de la población, por tanto, las medidas que se empiecen a aplicar para mejorar la eficiencia en el uso del agua en este sector pueden contribuir a solucionar esta problemática.

Según la FAO¹, la seguridad alimentaria está amenazada por la escasez de agua, y la mayor parte de la presión sobre la tierra y el agua proviene directamente de la agricultura, y un estudio de las Naciones Unidas, muestra que alrededor de un tercio de las ciudades del mundo que dependen del agua superficial se enfrentan a la competencia de la agricultura, que utiliza aproximadamente el 72% de las extracciones mundiales de agua dulce.

Se calcula que para el año 2050 la agricultura tendrá que producir casi un 50% más de alimentos que en el año 2012 para satisfacer la demanda mundial (FAO, 2021). Por lo tanto, mejorar la eficiencia del riego agrícola puede tener un impacto positivo en la seguridad alimentaria. Al optimizar el uso del agua y la energía, se aumenta la disponibilidad de recursos para la producción agrícola en zonas con escasez de agua, lo que puede ayudar a aumentar la producción de alimentos y garantizar su disponibilidad a largo plazo.

¹ La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA, o más conocida como FAO.

Con respecto a la reducción en la disponibilidad de agua, el sector de la agricultura necesita adaptarse mejorando la eficiencia y modernización del riego, así mismo, cambiando los patrones de cultivo por una agricultura climáticamente inteligente y explorando fuentes de agua alternativas como las subterráneas, pero mediante la ordenación de cuencas hidrográficas o fluviales o con el uso de aguas residuales recuperadas para riego (Naciones Unidas, 2023; FAO, 2021).

En ese sentido, el riego de cultivos puede optimizar el uso del agua mediante una distribución eficiente y controlada del recurso (Bwambale et al., 2022); poder controlar mejor su suministro garantiza un crecimiento óptimo un mayor rendimiento de los cultivos agrícolas, lo que aporta a la diversificación de cultivos y a una mayor expansión de tierras cultivables, ya que proporciona una fuente constante de agua a los cultivos generando un mayor control sobre el suministro de esta, principalmente en zonas donde las precipitaciones son insuficientes o irregulares; mejora la calidad de las plantas sensibles al estrés hídrico y si se diseña adecuadamente, contribuye a la conservación del suelo, a reducir la erosión del suelo y a mejorar la retención de nutrientes en este.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia del riego se mide no solo por el rendimiento de los cultivos, sino también en la conservación del agua y la sostenibilidad a largo plazo. Los avances tecnológicos en los sistemas de riego o la agricultura de precisión, como sensores, sistemas de información, maquinaria mejorada, y sistemas automatizados, permiten mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, ya que se requerirá ampliar el área cultivada bajo riego para lograr una mayor eficiencia en el uso del agua y garantizar la seguridad alimentaria en el mundo (Naciones Unidas, 2021; (Bwambale et al., 2022)

Mejorar la eficiencia energética en el riego tiene un gran impacto en los costos de producción de los agricultores. Implementar sistemas de riego más eficientes y el uso de fuentes de energía renovable pueden disminuir los gastos relacionados con el bombeo del agua y al consumo de energía eléctrica convencional. Esto puede permitir ahorros económicos a largo plazo, beneficiando la rentabilidad de las operaciones agrícolas. También, la reducción del consumo de energía y la adopción de fuentes de energía renovable para la operación de los sistemas de riego contribuyen a disminuir las emisiones de carbono y de los gases de efecto invernadero.

Sin embargo, es importante mencionar que la elección del método de riego dependerá de diferentes factores, como la topografía, la disponibilidad del agua, el tipo de suelo, el tipo de cultivo y según la necesidad específica de cada situación. Entre los principales sistemas de riego existentes en el mundo, asociados con algunos tipos de cultivos se encuentran los siguientes:

- *Riego por gravedad*, donde el agua fluye naturalmente por gravedad desde una fuente elevada hacia los campos de cultivo. Se utiliza en terrenos planos y bien drenados, principalmente en cultivos extensivos como cereales y forrajes que utilizan coberturas uniformes en grandes áreas.
- *Riego por aspersión*, donde el agua se esparce sobre los cultivos en forma de gotas pequeñas y es adecuado para una amplia variedad de cultivos y terrenos, como cultivos de hortalizas, frutales, césped y vegetales.
- *Riego por goteo*, donde se suministra agua directamente a la zona de raíces de cada planta a través de tuberías con pequeños orificios. Es ideal para terrenos irregulares y es altamente eficiente en el uso del agua; se utiliza principalmente en cultivos intensivos como frutales de alto valor, hortalizas y viveros.
- *Riego subsuperficial*, donde el agua se aplica por debajo de la superficie del suelo, a menudo a través de tuberías enterradas. Este método evita la pérdida de agua por evaporación y es bueno para suelos con alta salinidad, óptimo para cultivos sensibles a la humedad superficial como los arándanos.
- *Riego por inundación*, donde se inunda el área cultivada con agua y es apropiado para terrenos planos con suelos pesados, principalmente utilizado en cultivos de arroz y algunos de forrajes.
- *Riego por surcos*, donde el agua fluye a lo largo de surcos entre las líneas de cultivos, apropiado para suelos con pendientes ligeras y utilizado en cultivos de maíz, soja y vegetales.

Por lo anterior, en este documento haremos una revisión de literatura, donde se incluirán estudios de caso o experiencias de investigaciones asociadas con el uso eficiente del agua durante el riego,

el uso de fuentes de energía renovable y sus diferentes conclusiones y resultados, tratando de tener un panorama general sobre las tendencias que se están implementando a nivel mundial para aportar solución a esta problemática mencionada. De esta forma, ofrecer información actual, organizada y desglosada, que pueda ser una guía o punto de consulta para quien requiera estudiar o implementar procesos de riego cada vez más eficientes y sustentables.

Para ello, iniciaremos indicando la metodología empleada para seleccionar los artículos o estudios analizados, la forma de agruparlos de acuerdo con los resultados obtenidos y los aportes asociados con el tema de consulta.

1. Planteamiento del problema

El riego en la agricultura es una práctica fundamental pero costosa en términos de energía y consumo de agua. La extracción y bombeo del agua, necesarios para el riego, suelen depender de motores de combustión interna o de la red eléctrica convencional. Estos métodos consumen una cantidad significativa de energía. Además, las tuberías utilizadas para la distribución del agua a menudo presentan una baja eficiencia energética, requiriendo altos niveles de presión y, por ende, mayor consumo energético. Para empeorar la situación, el incremento en el costo de la energía eléctrica y de los combustibles fósiles ha resultado en un aumento de los costos asociados con el bombeo de riego.

Debido a esta problemática, toma cada vez más relevancia el estudio e implementación de sistemas de riego más eficientes energéticamente, por lo cual, explorar las diferentes alternativas tecnológicas o técnicas que se desarrollan actualmente.

1.1 Pregunta de investigación

¿Cuáles son los últimos estudios, prácticas o metodologías relevantes relacionados con la eficiencia en sistemas de riego en el mundo?

2. Justificación

El sector agrícola, al igual que otros sectores económicos, se encuentra ante la necesidad de avanzar hacia una agricultura que sea sostenible y eficiente desde el punto de vista ambiental y económico, especialmente en aquellas actividades que requieren un mayor consumo de recursos como energía y agua. En este sentido, se busca revisar y comprender el estado actual del conocimiento en relación con la eficiencia energética en los sistemas de riego utilizados en la agricultura. Al investigar y analizar los estudios previos, se podrán identificar las prácticas, tecnologías y enfoques utilizados en la mejora de la eficiencia energética en el riego agrícola. Para lograrlo, se ha recopilado información de diversos artículos de investigación y estudios de caso, en su mayoría publicados en la última década.

La optimización del uso del agua y la energía en la producción agrícola es fundamental no solo para minimizar el desperdicio de este recurso escaso, sino también para reducir los costos y el impacto ambiental asociados. Esto pueden ser de gran utilidad para los agricultores, técnicos agrícolas y responsables de políticas que buscan implementar prácticas de riego más eficientes y sostenibles.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Proporcionar un compendio de un amplio número de artículos, encontrados en bases de datos electrónicas, estudios o metodologías asociadas con eficiencia en el uso de agua y energía en sistemas de riego para la agricultura durante la última década.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar los principales estudios asociados con eficiencia en sistemas de riego a través de una metodología semisistemática.
- Organizar y agrupar los resultados encontrados en la revisión de literatura.

4. Metodología utilizada.

La metodología implementada consistió inicialmente en la búsqueda de bases de datos electrónicas, para esto se eligió utilizar los recursos del sistema de bibliotecas de la Universidad de Antioquia, ingresando por el enlace de “Recursos de información digital y electrónica”, después nos enfocamos en identificar los portales o plataformas de literatura académica donde se encuentren artículos o bibliografía enfocada a la ingeniería o a la ciencia, por lo cual se eligió el portal ScienceDirect para la respectiva búsqueda, donde se encuentran investigaciones avanzadas, literatura científica, técnica y de salud en texto completo y revisada por pares de Elsevier.

Se utilizaron principalmente algunas palabras clave para la búsqueda que estuvieran asociados con bombeo de riego, energías renovables y eficiencia en el riego entre los años 2007 y 2023, como por ejemplo: “water pumping and efficiency irrigation systems crops” (11.604 resultados); “efficiency pumping irrigation systems” (11.711 resultados), “irrigation systems and renewable energies crops” (9.042 resultados) y con “efficiency in the use of water and energy in irrigation” (con las palabras “efficiency irrigation” en el título) se presentaron 2.478 resultados.

De los cuales, se eligieron algunos estudios que estuvieran asociados con cómo hacer que el riego sea más eficiente para el uso del agua y la energía. A continuación, se mencionarán los estudios y resultado de los artículos elegidos.

Tabla 1 Bibliografía seleccionada

N°	Titulo	Autores	Año
1	Efficiencies in the Tumbaco irrigation system, Ecuador	Randon Ortiz Calle, Jaime Pazmiño Mayorga, Maritza Chile Asimbaya	2021
2	Optimization tool to improve the management of the leakages and recovered energy in irrigation water systems	Carlos Andrés Macías Ávila, Francisco-Javier Sánchez-Romero, P. Amparo Lopez-Jiménez, Modesto Pérez-Sánchez	2021
3	Rehabilitating pressurized irrigation networks for an increased energy efficiency	I. Fernández García, E. Creaco, J.A. Rodríguez Díaz, P. Montesinos, E. Camacho Poyato, D. Savic	2016
4	Semi-arranged demand as an energy saving measure for pressurized irrigation networks	I. Fernández García, R. González Perea, M.A. Moreno, P. Montesinos, E. Camacho Poyato, J.A. Rodríguez Díaz	2017
5	The increasing effects in energy and GHG emission caused by groundwater level declines in North China's main food production plain	Guo Yu Qiu, Xiaonan Zhang, Xiaohui Yu, Zhendong Zou	2018
6	A comprehensive performance assessment system for diagnosis and decision-support to improve water and energy efficiency and its demonstration in Portuguese collective irrigation systems	Dalia Loureiro, Paula Beceiro, Madalena Moreira, Carina Arranja, Diana Cordeiro, Helena Alegre	2023
7	An intelligent irrigation management model for direct injection of solar pumping systems	Jorge Cervera-Gascó, Jesús Montero, Miguel A. Moreno	2023
8	What did irrigation modernization in China bring to the evolution of water-energy-greenhouse gas emissions?	Yongqiang Zhang, Maosheng Ge, Qianwen Zhang, Shaopeng Xue, Fuqiang Wei, Hao Sun	2023
9	Development of a solar powered smart irrigation control system Kit	Joshua Wanyama, Paul Soddo, Prossie Nakawuka, Peter Tumutegyreize, Erion Bwambale, Isaac Oluk, William Mutumba, Allan John Komakech	2023
10	Photovoltaic powered irrigation system applied to familiar agriculture	Chilundo, R. J., Carvalho, Paulo C. M.; Diniz, M. M. N.; Bezerra, A. M. E	2015
11	The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand	J. A. Rodríguez-Díaz, L. Pérez-Urrestarazu, E. Camacho-Poyato and P. Montesinos	2011

N°	Titulo	Autores	Año
12	The Efficiencies, Environmental Impacts and Economics of Energy Consumption for Groundwater-Based Irrigation in Oklahoma	Divya Handa, Robert S. Frazier, Saleh Taghvaeian and Jason G. Warren	2019
13	Methodological Advances in the Design of Photovoltaic Irrigation	Martín Calero-Lara, Rafael López-Luque and Francisco José Casares	2021
14	Socioeconomic and Climatic Impacts of Photovoltaic Systems Operating High-Efficiency Irrigation Systems: A Case Study of the Government Subsidy Scheme for Climate-Smart Agriculture in Punjab, Pakistan	Faakhar Raza, Muhammad Tamoor and Sajjad Miran	2021
15	Smart Farming: Integrated Solar Water Pumping Irrigation System in Thailand	Meilinda Ayundyahrini, Danar Agus Susanto, Hermawan Febriansyah, Fariz Maulana Rizanulhaq, and Gama Hafizh Aditya	2023
16	A comprehensive and systematic study in smart drip and sprinkler irrigation systems	Drashti Bhavsar, Bhargav Limbasia, Yash Mori, Mohmmadali Imtiyazali Aglodiya, Manan Shah	2023
17	Optimization of irrigation timing for sprinkler irrigation system using convolutional neural network-based mobile application for sustainable agriculture	Naseeb Singh, Kethavath Ajaykumar, L.K. Dhruw, B.U. Choudhury	2023
18	Solar photovoltaic coupled with compressed air energy storage: A novel method for energy saving and high quality sprinkler irrigation	Qianwen Zhang, Maosheng Ge, Pute Wu, Fuqiang Wei, Shaopeng Xue, Bo Wang, Xinbo Ge	2023
19	Energy and carbon budgeting in a soybean–wheat system in different tillage, irrigation and fertilizer management practices in South-Asian semi-arid agroecology	G.A. Rajanna, Anchal Dass, Vinod K. Singh, Anil.K. Choudhary, Venkatesh Paramesh, Subhash Babu, Pravin K. Upadhyay, Manjanagouda S. Sannagoudar, B.C. Ajay, K. Viswanatha Reddy	2023
20	The food-energy-water-carbon nexus of the rice-wheat production system in the western Indo-Gangetic Plain of India: An impact of irrigation system, conservational tillage and residue management	Ram K. Fagodiya, Ajay Singh, Ranbir Singh, Sonia Rani, S. Kumar, Arvind Kumar Rai, Parvender Sheoran, Priyanka Chandra, R.K. Yadav, P.C. Sharma, A.K. Biswas, S.K. Chaudhari	2023
21	Development of green energy based micro-sprinkler irrigation system for small holdings of SAT region	Manoranjan Kumar, Ravikant V. Adake, K. Srinivas Reddy, K Sammi Reddy	2022

N°	Titulo	Autores	Año
22	Feasibility of integrated photovoltaic and mechanical storage systems for irrigation purposes in remote areas: Optimization, energy management, and multicriteria decision-making	Bashri A.A. Yousef, Rahaf Amjad, Noura Ali Alajmi, Hegazy Rezk	2022
23	A new optimization approach for the use of hybrid renewable systems in the search of the zero net energy consumption in water irrigation systems	Angel V. Mercedes Garcia, Francisco Javier Sanchez-Romero, P. Amparo Lopez-Jimenez, Modesto Perez-Sanchez	2022
24	Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods	Asif Irshad Khan, Fawaz Alsolami, Fahad Alqurashi, Yoosef B. Abushark, Iqbal H. Sarker	2022
25	A mini review on solar energy based pumping system for irrigation	Desh Bandhu Singh, Anmol Mahajan, Divyansh Devli, Kiran Bharti, Shashank Kandari, Gaurav Mittal	2021
26	Zoning irrigation smart system based on fuzzy control technology and IoT for water and energy saving	Hamza Benyezza, Mounir Bouhedda, Samia Rebouh	2021
27	Hybrid powered intelligent irrigation system using Oman Falaj and solar energy	Khadersab Adamsab, Marwa Saif, Sultan Saif, Ishaq Khamis, Wafa Talib	2021
28	Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring	M. Benzaouia, B. Hajji, A. Mellit, A. Rabhi	2023
29	Study of economic and sustainable energy supply for water irrigation system (WIS)	Aziz Haffaf, Fatiha Lakdja, Rachid Meziane, Djaffar Ould Abdeslam	2021
30	An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules	F. J. Navarro-González, M. Á. Pardo, H. E. Chabour, T. Alskaif	2023
31	Economic and environmental impact assessment of sustainable future irrigation practices in the Indus Basin of Pakistan	Muhammad Muzammil, Azlan Zahid & Lutz Breuer	2021
32	Feasibility of Utilizing Photovoltaics for Irrigation Purposes in Moamba, Mozambique	Arsénio José Mindú, Jó António Capece, Rui Esteves Araújo and Armando C. Oliveira	2021
33	Optimización del Coste Energético en Redes de Riego a Presión Mediante su Rehabilitación	Fernández García, I, Rodríguez Díaz, J.A. Montesinos, P., Camacho Poyato, E.	2016

N°	Titulo	Autores	Año
34	Optimization Strategy for Improving the Energy Efficiency of Irrigation Systems by Micro Hydropower: Practical Application	Modesto Pérez-Sánchez, Francisco Javier Sánchez-Romero, Helena M. Ramos and P. Amparo López-Jiménez	2017
35	PATs Behavior in Pressurized Irrigation Hydrants towards Sustainability	Modesto Pérez-Sánchez, Joao FP Fernandes, JP Costa Branco, Fr Amparo López Jimenez and Helena M.Ramos	2021
36	Water and energy management in an automated irrigation district	T. Stamboulia, J.M. Facib, N. Zapata	2014
37	Practical application of an intelligent irrigation system to rice paddies in Taiwan	Yuan-Fu Zeng a, Ching-Tien Chen b, Gwo-Fong Lin	2023
38	Renewable Energy Based Smart Irrigation System	Sudharshan N, AVS Kasturi Karthik, JS Sandeep Kiran, S.Geetha*	2019
39	Irrigation area, efficiency and water storage mediate the drought resilience of irrigated agriculture in a semi-arid catchment	Bruce Lankford, Catherine Pringle, Jon McCosh, Mlungisi Shabalala, Tim Hess, Jerry W. Knox	2023
40	Performance assessment of smallholder irrigation based on an energy-wateryield nexus approach	Luciano Mateos, Alexsandro Claudio dos Santos Almeida, José António Frizzone, Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima	2018
41	Agricultural irrigation scheduling for a crop management system considering water and energy use optimization	Omid Abrishambaf, Pedro Faria, Luis Gomes, Zita Vale	2020
42	Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review	Erion Bwambale, Felix K. Abagale, Geophrey K. Anornu	2022
43	Increased profitability and energy savings potential with the use of precision irrigation	Silas Alves Souza, Lineu Neiva Rodrigues	2022

5. Discusión y resultados

En la agricultura se implementan diferentes tipos de riego, cada uno con características específicas y aplicaciones particulares. Cada método de riego tiene sus ventajas y desventajas, y la elección del tipo de riego depende de factores como el tipo de cultivo, las características del suelo, la disponibilidad de agua y la eficiencia deseada en la aplicación del agua. Es importante seleccionar el método de riego más adecuado para optimizar el uso del agua y promover una agricultura sostenible.

Existen diversos métodos de riego ampliamente utilizados en la agricultura, cada uno adaptado a diferentes necesidades y condiciones. Estos incluyen: riego por inundación, para cultivos inundables y terrenos planos; riego por surcos, para cultivos en hileras donde se crean surcos para conducir el agua; riego por aspersión (presurizado), pueden ser de baja o alta presión, se adapta a diferentes tipos de cultivos y suelos; riego por goteo (presurizado), se aplica de manera más precisa y eficiente; riego por microaspersión (presurizado), simula al riego por aspersión pero con gotas más pequeñas y un caudal de agua reducido y el riego subterráneo, donde se utilizan tuberías enterradas a una cierta profundidad (Gurovich, 1985)

La eficiencia energética en los sistemas de riego agrícola es un tema de gran importancia para optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental. Según estudios recientes, el riego es una de las actividades con mayores requerimientos de energía en el sector agrícola (Alves Souza & Neiva Rodrigues, 2022; Qiu et al., 2018). La implementación de sistemas de riego eficientes o riego de precisión pueden proporcionar beneficios significativos al mejorar la gestión del agua y al reducir el consumo energético asociado a la extracción y bombeo de agua.

“Los sistemas de bombeo de agua están clasificados según la fuente de energía con que se alimenta el sistema y las características técnicas del sistema. Existen cinco tipos de sistemas de bombeo en el riego de cultivos, como el sistema de bombeo fotovoltaico, sistema de bombeo de viento, sistema de bombeo conectados a la red eléctrica convencional, sistemas de bombeo accionados por motores de combustión interna y sistema de bombeo manual” (Chilundo et al., 2015)

Los principales problemas que pueden surgir en un riego deficiente son: pérdida de agua (percolación profunda, encharcamiento y escorrentía), lavado de nutrientes del suelo (lixiviación de fertilizantes), bajos rendimientos de los cultivos, lo que implicaría que la productividad de la tierra no se incremente apreciablemente y las inversiones en grandes obras hidráulicas no tengan justificación económica. Además, el riego ineficiente no solo agota los recursos de agua dulce, sino que también aumenta el consumo de energía y los costos operativos para los agricultores (Bwambale et al., 2022; Wanyama et al., 2023)

En cuanto a la eficiencia con que los agricultores aplican el riego, este depende de dos factores: el manejo del agua durante el riego y las características hídricas del suelo. En ese sentido, el manejo del agua durante el riego es el factor más relevante para la aplicación de eficiencia energética, pues se distinguen varios aspectos que inciden en la eficiencia de aplicación del agua, como el diseño del sistema de riego, los caudales utilizados y la dirección del flujo, la frecuencia de riego y el tiempo de riego (Gurovich, 1985; Ortiz Calle et al., 2021)

Dentro de las alternativas estudiadas para aumentar la eficiencia energética en los sistemas de riego, se han encontrado diversos artículos que han estudiado la implementación de sistemas de control inteligentes, la modernización de los sistemas de riego, la gestión de medidas para optimizar los requerimientos energéticos o el uso de fuentes de energía renovable, los cuales aplicando uno o la combinación de varios de estos aspectos se puede llegar a reducir el consumo de agua y la energía logrando mejores resultados en el desarrollo de los cultivos.

A continuación, se agruparán algunos estudios encontrados que se puedan clasificar entre los aspectos mencionados anteriormente, sin embargo, cabe aclarar que algunos estudios han aplicado una combinación de varios aspectos, por lo cual, se incluirán en el que consideremos más representativo de acuerdo con los resultados obtenidos:

Algunos autores como Rodríguez – Díaz, Stamboulib (2014), García (2017), Pérez-Sánchez (2017, 2021), Qiu G. (2018), entre otros, han realizado estudios asociados con la modernización del riego o con medidas de optimización de requerimientos energéticos, por lo cual se mencionarán los principales aportes de los estudios seleccionados:

Según (Abrishambaf et al., 2020), tendencia de pasar de canales de riego convencional a redes presurizadas se debe en gran parte a que el transporte del agua presurizada tiene beneficios como la flexibilidad al ajustarse a la topografía, la conservación de la calidad del agua y una mayor eficiencia; sin embargo, también mencionan, al igual que varios autores, que este tipo de riego presurizado requiere mayor consumo de energía.

En ese sentido, como ejemplo se encontró un caso en España, donde para lograr una mejor eficiencia en sistemas de riego optaron por la modernización de los sistemas de riego y la aplicación de medidas para optimizar los altos requerimientos energéticos; por lo cual, han pasado de redes de canales abiertos a redes presurizadas y se ha desarrollado una metodología para optimizar el consumo energético en redes de riego presurizado. La metodología considera un modelo de demanda semi-arreglada, que combina la gestión de la red por sectores y el control de puntos críticos, así como la optimización del desempeño de las estaciones de bombeo, logrando ahorros potenciales que oscilan entre 5,6% y el 25,8% (Rodríguez-Díaz et al., 2011) En otro estudio se menciona que a causa de los planes de modernización del riego, han aumentado en este país las superficies de riego por aspersión y además a la mayoría de estas redes modernizadas se han incorporado modernos sistemas de telemetría y telecontrol (Stambouli et al., 2014)

Por otro lado, según García, I. F., et al. (2017) y Stambouli T, et al. (2014), la modernización del riego en España implicó un aumento en el costo energético del riego porque aumenta el consumo de energía, por lo tanto, para minimizar el costo de la factura de electricidad de un distrito de riego es importante mantener una alta eficiencia de riego y optimizar las operaciones de bombeo; pero tal mismo tiempo, el beneficio al disminuir el consumo de agua y el costo laboral del riego (necesidades de mano de obra en riego). Sin embargo, hay una particularidad y es que debido a la posibilidad de modernización y automatización del riego, se ha promovido el aumento de grandes superficies de cultivos en la región y por lo tanto, aumenta la cantidad de agua consumida, aunque a la vez haya disminuido la necesidad de la profundidad del riego en los cultivos (mayor eficiencia) y mejorado el índice de desempeño del riego, pasando de 74% a 87%.

También, como medida de optimización, se menciona en los estudios que es importante tener en cuenta la selección de las tarifas de energía realizando riego en las horas de menor demanda, como regar en la noche para evitar las horas pico, sin embargo, esto último no reduce la demanda de energía en el riego (Fernández García et al., 2017; Stambouli et al., 2014). En cuanto a esto, también fue importante el uso de los datos de la telemetría para la gestión hídrica y eléctrica, pues podría mejorar la optimización de los costos de riego, conociendo el patrón de la distribución de los cultivos, las necesidades de riego y la potencia contratada en función de la demanda eléctrica.

También (Ávila et al., 2021) presentan una metodología para mejorar la sostenibilidad del riego a través de la evaluación de fugas en varias juntas y tuberías mediante la utilización de datos de volumen que se inyectan y registran en el agua. Esta metodología sugiere varios escenarios operativos basados en la presencia de fugas y emplea un procedimiento de optimización dual para identificar y elegir el método de recuperación más efectivo. La propuesta fue aplicada a un sistema de riego real, los valores de energía recuperable anual fueron superiores a 32.000 kWh y las fugas anuales disminuyen por encima de los 18.000 m³ en las mejores configuraciones, utilizando tres sistemas de recuperación, que se configuran con tres PAT (Pump as turbine) cada uno.

Por su parte (Pérez-Sánchez et al., 2017), en su investigación para desarrollar una metodología donde buscaba mejorar la eficiencia energética en redes de riego presurizado, menciona que la mejora consiste en la instalación de microturbinas hidroeléctricas, reemplazando las válvulas de reducción de presión para reducir las fugas.

En el año 2021, realizaron también un estudio sobre el uso de bombas como turbinas (PAT) para la recuperación de energía en sistemas de riego, demostrando la posibilidad de recuperar 44 MWh/año. Validaron que la instalación del sistema PAT no pone en riesgo el sistema de riego, que es posible instalar una bomba que funcione como turbina en un hidrante de riego. Además de ser posible, que se deben implementar soluciones de recuperación de energía que utilicen un exceso de presión hidráulica, como parte de la gestión del agua en los sistemas de riego y aporte para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (Pérez-Sánchez et al., 2021).

(Qiu et al., 2018) en los estudios realizados, relacionan algunos factores similares que se presentan en el norte de China, en Estados Unidos, en la India, en Pakistán y en Irán, donde por causa de la necesidad de riego en los cultivos se ha llevado a una mayor explotación de las aguas subterráneas (un 20% aproximadamente en la llanura norte de China). En esta región el consumo de energía por unidad de bombeo de agua ha aumentado (casi un 22%) y emite más gases de efecto invernadero – GEI (un 42% aproximadamente). En este estudio, recomiendan combinar las tecnologías de ahorro de energía (energías renovables y cambio de bombas) con las tecnologías de ahorro de agua (riego ahorrador de agua) para lograr resultados óptimos. Aunque en el artículo no especifican un tipo de riego en particular, se podría implementar sistemas de riego presurizados o por goteo, pues en la literatura y en diferentes estudios estos pueden disminuir el consumo de agua. Así mismo, se recomendó el uso de bombas eléctricas para reemplazar las bombas Diesel que son de alto uso en estos países y el uso de fuentes de energía renovable, con el propósito de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con respecto a esto último, (Sudharshan et al., 2019), quienes desarrollaron un sistema de riego inteligente automatizado a pequeña escala utilizando energía solar, obtuvieron como resultado el aumento de la eficiencia de agua y la energía y una disminución en la necesidad de mano de obra pues mediante la introducción de una función automatizada se podía verificar el estado del suelo y las necesidades de bombeo, entre otros parámetros; sin embargo, tiene sus limitaciones y están relacionadas con la radiación solar de cada lugar donde se implemente y el almacenamiento de energía pues es costoso en caso de requerirlo.

En China, (Y. Zhang et al., 2023), realizaron una comparativa sobre datos entre los años 2005 y 2015 de consumo de agua, energía y GEI producidos con el riego, sobre diferentes provincias del país, teniendo en cuenta factores como las fuentes de agua, las tecnologías de distribución y la disponibilidad regional de agua. Concluyen sobre un aumento en el consumo de energía de 22.3%, por ello, la importancia de seguir promoviendo activamente técnicas de riego que ahorren agua y energía en las regiones del Norte y teniendo en cuenta las condiciones locales. Así mismo que la tecnología de riego que ahorra agua puede mejorar la eficiencia sin aumentar el consumo de energía, y de las medidas para lograr esto, pueden ser el riego por goteo, el riego por aspersión, el riego por tuberías de baja presión y la agricultura de alta eficiencia.

(Handa et al., 2019) hicieron un estudio sobre la eficiencia del bombeo de riego en dos diferentes acuíferos de Oklahoma, Estados Unidos, incluyeron las emisiones de GEI y los costos para bombas eléctricas y de gas natural. Pudieron concluir que las bombas eléctricas y la mayoría de las bombas a gas funcionaban por debajo de los niveles estándar alcanzables, por lo tanto, si las bombas se operaran en sus óptimas eficiencias, se podrían haber tenido reducciones del 34% y 19% en el consumo medio de energía durante el período 2001-2017.

(Wang et al., 2022) realizaron un estudio de caso sobre la gestión operativa del sistema de riego por tuberías de alta presión Robinvale para la selección mejorada del punto de ajuste de la bomba mediante un modelo hidráulico calibrado. Optaron por nuevos puntos de ajuste de las bombas para minimizar las presiones de la red y cumplir con los estándares de los clientes, esto proyectó ahorros del 4,7% en el coste de la energía de bombeo y en las emisiones de gases de efecto invernadero.

(Cremades et al., 2016) efectuaron un análisis de la eficiencia del riego y el uso de energía en cuatro provincias de China, donde validaron la configuración del suministro de agua para determinar los posibles ahorros de energía derivados de la reducción del consumo de agua.

Pudieron encontrar que las tecnologías más caras están vinculadas a ventajas y desventajas, ya que cuando se presuriza una red, a pesar de reducir el consumo de agua, se consume más energía eléctrica, que dependiendo de la fuente puede producir más GEI, mientras que las tecnologías de menor precio obtienen beneficios colaterales, tanto reducción en consumo de agua, como disminución de emisiones, por lo tanto, que se deberían fomentar las tuberías de baja presión en zonas de regadío con aguas subterráneas y el revestimiento de los canales n zonas de aguas superficiales.

Así mismo, que los ahorros energéticos están directamente relacionados con la cantidad de agua que se deba utilizar para el riego, a mayor consumo de agua, mayor energía necesaria para bombearla al punto requerido, por lo tanto, una buena configuración puede conducir a ahorros energéticos.

Como medidas de optimización de requerimientos energéticos, es importante también partir de una evaluación inicial o auditoría energética de los sistemas de riego, para así tener una línea base e identificar claramente qué acciones de mejora se pueden ejecutar en cada caso particular, es una práctica que representaría buenos resultados para mejorar la eficiencia energética y el uso del agua en este sector.

En ese sentido, una buena medida que se realizó en Ecuador (Ortiz Calle et al., 2021) la está un poco más asociada con la aplicación de auditoría o diagnóstico de un sistema de riego, se desarrolló partiendo desde la planificación y recopilación de información, la toma de datos in situ, además se hizo una evaluación con un trabajo investigativo de seguimiento y finalmente se presentaron propuestas de mejora y potencial de ahorro en cada proceso.

Esta práctica, puede ser importante también para los sistemas de riego y así analizar las eficiencias o ineficiencias, puesto que se presentan propuestas de mejora para cada caso específico, sin generalizar las medidas aplicadas en diferentes partes del mundo, pues es importante tener en cuenta la variabilidad que se puede presentar en aspectos como el clima, el tipo de suelo, el tipo de cultivo, las necesidades de los usuarios, entre otros.

Igualmente, el estudio de (Abrishambaf et al., 2020), se basó en una metodología propuesta para la evaluación energética de un sistema de transporte de agua a presión (tubería). En el cual se desarrollaron varios ejemplos donde se evalúan las ineficiencias en la línea de bombeo, en la línea de gravedad y en la red de riego. Así mismo, se explica claramente las variables o datos aplicados en las ecuaciones. En el riego las ineficiencias se encuentran en las estaciones de bombeo y en las tuberías por fugas y fricciones, siendo esta última inevitable en el sistema.

Así mismo, en Ecuador, la junta de regantes del sistema de riego de Turbaco y sus usuarios (aprox. 1.055,6 ha y 2.500 usuarios en el año 2017), realizaron un estudio para conocer las eficiencias de conducción, distribución, aplicación, sistema y global en el sistema de riego Turbaco, hasta llegar a identificar el rol de la junta como de los agricultores en la operación de la infraestructura hidráulica y a nivel de parcela regante. Inicialmente, determinaron la eficiencia de cada proceso, conducción, Distribución, aplicación, sistema y global, además se comparó con eficiencias de diferentes proyectos del mundo como eficiencias de conducción entre 56,7% al 88,8%, en distribución del 65% al 88,6%, en la aplicación del 40,2% al 66,1% y eficiencias del

sistema del 38,5% al 75,6% considerándose eficiencias entre regulares y buenas. Finalmente se identificaron los sitios que tenían potencial de mejora y se realizaron las conclusiones específicas para cada proceso (Ortiz Calle et al., 2021)

(Loureiro et al., 2023) desarrollaron una propuesta para la aplicación de un sistema de evaluación del rendimiento (PAS) por sus siglas en inglés, el cual se empleó para diagnosticar y priorizar las alternativas en un sistema de gravedad y para comparar los sistemas de riego por gravedad y presurizado. De los diagnósticos pudieron encontrar en los sistemas de gravedad que la falta de rehabilitación de los canales y el control de las descargas de agua son los principales problemas en este tipo de sistema. En los sistemas presurizados, la baja eficiencia en los sistemas de bombeo y el desempeño en pérdidas reales conducen a un exceso de suministro de energía.

En su estudio, también da recomendaciones para la adopción de tecnologías de riego inteligentes, como sensores de humedad del suelo y controladores basados en el clima, para optimizar el uso del agua en función de las necesidades reales de las plantas, además realizaron un análisis comparativo entre sistemas de riego colectivos e identificación de las mejores prácticas y los puntos débiles de los sistemas de riego.

Dentro de las recomendaciones mencionan el uso de aguas residuales recicladas o tratadas, la implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas, como las inspecciones y reparaciones periódicas de los sistemas, que puede ayudar a prevenir las fugas de agua y garantizar el funcionamiento eficiente de los sistemas de riego, proporcionar formación y educación a los agricultores sobre las mejores prácticas para la gestión del riego.

En cuanto a los estudios asociados con la implementación o uso de fuentes de energía renovable se relacionan a continuación los principales aportes en los artículos seleccionados y relacionados con eficiencia en sistemas de riego:

El uso de fuentes de energía renovable en el riego agrícola se ha convertido en una alternativa atractiva para reducir los costos y la dependencia de los combustibles fósiles. Estudios han demostrado que la combinación de tecnologías de riego eficiente con energías renovables

puede ser altamente efectiva para mejorar la eficiencia energética en el riego agrícola (Muzammil et al., 2021)

La energía solar fotovoltaica utilizada como fuente de energía para que las bombas de riego funcionen se ha convertido en una solución clave y viable, gracias a la disminución de los costos de los paneles fotovoltaicos durante los últimos años, así mismo, han venido mejorando en términos de potencia nominal y de eficiencia, haciéndolos más interesantes para su implementación en el sector de la agricultura (Navarro-González et al., 2023).

En la india, por ejemplo, (Kumar et al., 2022) hicieron un estudio en el cual utilizaron un sistema de microaspersores para mejorar el riego de cultivos pequeños, en zonas marginales, donde dependen casi exclusivamente del agua lluvia que logran almacenar. Este proyecto además incluyó el aprovechamiento de la energía solar, ya que el sistema de bombeo utilizado para tomar el agua y llevarla hasta el tanque elevado de almacenamiento, es alimentado a través de un panel solar. El estudio logró demostrar que con este sistema es posible irrigar hasta 0,5 acre de tierra (2,202343 ha). Así mismo, y validando el uso de aspersores en diferentes sistemas de riego, por su lado (Fagodiya et al., 2023) analizaron comparativamente varios sistemas, dentro de las variables estudiadas incluyeron el consumo de energía, identificando que el labrado convencional es el que mayor consumo tiene, en comparación con el riego por goteo y el riego por miniaspersores. Esta diferencia está dada principalmente a un menor consumo de agua (47-60%), un menor consumo de combustible en operaciones de labranza reducida (45 %), un menor consumo de fertilizantes LCC (24-34 %) y 25 % de ahorro en contratación de mano de obra para diferentes operaciones agrícolas.

(Mateos et al., 2018) hicieron una evaluación del desempeño en el campo de los sistemas de microirrigación para pequeños agricultores en Brasil, utilizaron un modelo de análisis que vincula el rendimiento del riego con la eficiencia energética, encontraron deficiencias del sistema debidas al filtrado inadecuado y a la ineficiencia del bombeo.

Dentro las conclusiones, indican que la adopción de tecnología de riego extranjera podría acelerarse con la colaboración entre los innovadores locales y los servicios de asesoramiento en materia de riego con apoyo público.

En Tailandia, los agricultores de zonas remotas han adoptado el uso de energía solar como fuente de energía para las bombas de agua utilizadas en el riego. Además, ha implementado la práctica de la agricultura inteligente, como sistema de riego con monitoreo integrado y funcionamiento automático, en este sistema, se emplea tecnología de la información, así como herramientas como GPS, robótica, drones y vehículos autónomos, para desarrollar un sistema de control que mejora la eficacia, la eficiencia y la precisión del riego. Este enfoque de riego que utiliza energía solar no se limita únicamente a Tailandia, sino que también se está implementando en otros países de Asia. En países como Bangladesh, Pakistán, India, Sri Lanka e Indonesia, se han comenzado a adoptar sistemas similares, lo que demuestra la creciente tendencia de utilizar energía solar en el riego como una solución integral para mejorar la práctica agrícola en la región (Ayundyahrini et al., 2023)

(Q. Zhang et al., 2023) realizaron un estudio para el desarrollo y la evaluación de un sistema de almacenamiento de energía solar fotovoltaica junto con aire comprimido (CAES-SPV) para el riego por aspersión. Mediante este demostraron la viabilidad de utilizar energía solar junto con aire comprimido para los sistemas de riego por aspersión y destacaron el potencial de una utilización eficiente de la energía solar y de una fumigación de alta calidad. El sistema CAES-SPV redujo eficazmente el impacto adverso del impacto de los rociadores en la tasa de infiltración del suelo, lo que se tradujo en una mejora de la eficiencia energética.

En Sudán, (Yousef et al., 2022) propusieron un estudio para analizar diferentes combinaciones de sistemas híbridos para el riego en áreas remotas mediante generadores fotovoltaicos y diésel, volante de inercia y diferentes baterías como sistemas de almacenamiento de diferentes tamaños como principal fuente de producción de energía.

Las alternativas fueron evaluadas económicamente a través del programa HOMER centrándose en evaluar la viabilidad y la rentabilidad del sistema. El análisis consideró el costo actual neto (NPC) total y el costo de la energía (COE) como factores clave para determinar la rentabilidad, sin dejar de lado factores como la generación de energía del sistema, el costo de la energía, el consumo de combustible y las emisiones de carbono.

El estudio también incorporó enfoques de toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM) para tener en cuenta tanto los factores económicos como ambientales a la hora de seleccionar la opción óptima.

El resultado fue la alternativa que incluía un tamaño DG/PV de 750 kW y una batería de almacenamiento de productos químicos como la mejor opción. La opción que incluía 1000 kW de tamaño DG/PV, y la batería de almacenamiento de productos químicos (BS) a pesar de ser la más económica fue descartada por la gran cantidad de emisión de gases.

En Algeria (Haffaf et al., 2021) realizaron un estudio muy similar, implementando una estrategia combinada de gestión del suministro y traslado de la carga, mostrando de igual manera que el escenario fotovoltaico, de batería y diésel resultó ser el más óptimo y atractivo, utilizaron también el software HOMER para la selección de sistemas en función de criterios técnicos, económicos y ambientales. Además, la estrategia indicó una reducción de las emisiones netas de CO₂, costo actual neto total y costo de energía.

(Calero-Lara et al., 2021) desarrollaron un algoritmo basado en una matriz de trabajo diario teniendo en cuenta los balances de agua y energía para gestionar la energía solar fotovoltaica en sistemas de riego. Se tuvieron en cuenta datos diarios del clima, de los cultivos, del caudal, de la presión y las pérdidas de la red de riego, dando como resultado un uso eficiente de la energía y con los consumos o requisitos de agua necesarios para el riego, con el tiempo de riego programado y con los déficits del agua, adicionalmente, sincronizó la producción de la energía con las necesidades energéticas del sistema hidráulico. Este algoritmo se implementó en un caso real, en el municipio de Estepa en el sur de España, en una finca con un área de 10 ha. El arrojó una eficiencia energética del 26,15% y un ahorro de emisiones de CO₂ de 6,29 Ton/año. Se tiene en cuenta que el riego con energía fotovoltaica de bombeo directo es más económico que los que utilizan baterías para acumular energía eléctrica

El gobierno de Pakistán también ha participado en los sistemas de eficiencia (Raza et al., 2021) estudiaron la puesta en marcha de un plan de subsidios para instalar sistemas fotovoltaicos para operar sistemas eficientes de riego por goteo y aspersión sobre la base de costos compartido en Punjab, Pakistan. Mostrando que la adopción de sistemas de alta potencia alimentados por

energía fotovoltaica permitió ahorrar importantes recursos, como energía, el consumo de agua y los costos de mano de obra, lo que se tradujo en un aumento de los rendimientos agrícolas y de los beneficios para los agricultores.

Así mismo comprobaron que el coste unitario del bombeo con energía fotovoltaica era de 19,12 PK/kWh, un 5% y un 63% más barato que el coste de la electricidad y el diésel subvencionados, respectivamente. Al comparar con el riego por inundaciones se obtuvo una reducción del 42% de ahorro de agua. Este tipo de iniciativas no solo reduce el consumo de agua y energía, sino que también promueven la mejora socioeconómica y mejora el nivel de vida de los agricultores, especialmente en áreas remotas.

(D. B. Singh et al., 2021) revisan literatura sobre los sistemas de bombeo para riego basados en energía solar, mostrando los grandes beneficios de estas alternativas, como una menor dependencia de las fuentes de energía convencionales y menores costos de operación, que pueden ser más rentables a largo plazo en comparación con los sistemas convencionales, ya que eliminan o reducen la necesidad de combustible o electricidad. También, indican que cuando se combina con un sistema de riego por goteo, hay un mejor control en la distribución del agua y de las pérdidas de esta; lo que permite una mayor productividad y eficiencia del agua en el sector agrícola. Esto puede resultar muy útil y beneficioso en áreas rurales muy alejadas y que no tienen conexión a la red eléctrica convencional. Concluyendo así que esta combinación con el riego por goteo presenta mayores beneficios en términos de eficiencia en el uso del agua y la energía que el riego convencional solo. Además, la productividad es mayor.

(Mindú et al., 2021) realizaron un estudio sobre la viabilidad del uso de un sistema solar fotovoltaico para el riego en Moamba (Mozambique) teniendo en cuenta la alta radiación solar, la proximidad del río a las áreas irrigadas y que las bombas de riego actuales en Moamba utilizan combustibles fósiles caros (gasóleo). Muestran también que el uso actual de bombas con combustibles fósiles es debido a que casi no cuentan con acceso a la electricidad (solo el 18% de agricultores), a los cuales les parece muy costoso. Además, derivado de las entrevistas con agricultores se evidencia restricciones financieras para comprar bombas eléctricas. Concluyen que las condiciones de la zona permitirían la implementación.

Otro tipo de medida implementada para la optimización y eficiencia durante el riego es el riego inteligente y/o automatización del riego. Según Zeng Y. et al. (2023), “aplicar tecnologías modernas al riego agrícola podría mejorar la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos”. Varios autores en sus estudios implementaron por ejemplo el uso de sensores, los cuales pueden leer e identificar condiciones reales y ayudar en la toma de decisiones sobre en qué momento y con qué cantidad se debe regar un cultivo.

En este sentido, los sistemas inteligentes de control del riego son muy utilizados en la agricultura. Estos sistemas utilizan tecnología avanzada y la automatización para optimizar las operaciones de riego. Donde se utilizan sensores y algoritmos inteligentes para asegurar un suministro de agua más preciso y oportuno para el cultivo. Adicionalmente, a veces para su funcionamiento utilizan la energía solar permitiéndoles operar de forma autónoma, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y los costos operativos. Un ejemplo de estos avances es el Smart Irri-Kit, el cual es un conjunto de herramientas que combina los beneficios de la energía solar y la planificación inteligente del riego, proporcionando una solución eficiente y sostenible para el gasto agrícola (Wanyama et al., 2023)

En el estudio de (Alves Souza & Neiva Rodrigues, 2022) utilizaron modelos en lenguaje Python para simular la demanda de riego para evaluar los beneficios de dos sistemas de riego de precisión con pivote central. Este se realizó en la región del Cerrado Brasileño; donde lograron identificar que el riego de precisión para las condiciones analizadas puede alcanzar un potencial de ahorro de energía del 25,3% aproximadamente y puede aumentar la rentabilidad en un 106,2% considerando el impacto de la variabilidad del suelo y la demanda de energía. Identificaron varios aspectos por lo que era importante realizar este estudio, por ejemplo, el alto costo de la energía que impacta directamente el costo de la producción y la falta de control y manejo del riego de los agricultores pues tienden a regar en exceso para evitar el estrés hídrico en el cultivo. Consideran que los avances tecnológicos (riego inteligente – sistemas remotos) pueden ser muy útiles sobre todo en este tipo de riego de pivote central, pues facilitan en la toma de decisiones del riego.

(Benzaouia et al., 2023), (Benyezza et al., 2021) y (Zeng et al., 2023), adicional a los sensores para identificación de condiciones, implementaron sistemas de precisión, que a partir de

la información recolectada, la comunican con el agricultor a través de una plataforma IoT (Internet de las cosas), mostrando las recomendaciones teniendo en cuenta diversos escenarios. La implementación de este tipo de sistema en Marruecos, Taiwan y en Algeria respectivamente, mostró un ahorro de energía y agua, en comparación con los sistemas tradicionales.

Así mismo, (Lankford, 2023) ha desarrollado modelos predictivos integrales y el internet de las cosas –(IoT) de forma que se pueda optimizar el proceso, el cual permite identificar y predecir condiciones de los cultivos indicando sobre dónde se pueden hacer reasignaciones a través de zonas de expansión y de reutilización, todo esto sin disminuir la producción.

(Cervera-Gascó et al., 2023) desarrollaron un modelo llamado i-Selector como complemento del modelo EVASOR ²para la gestión del riego, con el objetivo de establecer la secuencia óptima de combinaciones de apertura de subunidades para el riego. Este utiliza los resultados del modelo EVASOR para determinar el potencial de riego de cada subunidad y priorizar su riego, asigna una mayor probabilidad de apertura a las combinaciones de subunidades con un mayor número de horas útiles de riego, priorizando aquellas con más LED (subunidades de baja demanda de energía) y una probabilidad de apertura del 100% durante cada mes de riego.

Esto proporciona un mejor uso del agua y la energía en un sistema de bombeo solar de alta potencia, adicional tiene en cuenta factores como la energía fotovoltaica disponible, la capacidad de extracción del pozo y los criterios de calidad del riego para generar las estrategias de riego.

Con respecto al estudio realizado por (Zeng et al., 2023) en la región de Taiwán durante 4 años, donde también implementaron un sistema de riego inteligente basado en Internet de las cosas – IoT para monitorear cultivos de arroz y las condiciones climáticas, el cual se centró en mejorar la eficiencia energética y del agua en los sistemas de riego, dio como resultado tasas de ahorro de agua del 2,9-6,5% en la estación seca y del 8.8 -19,3% en estación húmeda cuando se combinó con estrategias de riego adecuadas, estas tasas de ahorro se calcularon en función de las precipitaciones efectivas y el coeficiente del cultivo; además, reportan que se redujo el consumo de agua de los

² Modelo integral de gestión de sistemas de bombeo solar fotovoltaico, a partir de datos climáticos y valores de energía inicial del agua, en forma del nivel dinámico, determinar la calidad del evento de riego de cualquier subunidad de un sistema complejo.

agricultores entre un 60% y un 80% y el rendimiento y las características agronómicas de los cultivos no se vieron afectadas por el sistema de riego inteligente.

(N. Singh et al., 2023) desarrollaron una aplicación móvil para predecir la humedad del suelo a través de imágenes, conociendo las características del cultivo y el sistema de aspersores. Esta aplicación utiliza un sistema matemático convolucional el cual según los resultados obtenidos mostró una precisión de clasificación del 97,1 % una predicción verdadera del 75,3% y con la comparación de riego convencional el estudio puede decir que con la implementación lograron un ahorro de 27,42% de energía, además de un 27,59% de agua.

(Khan et al., 2022) realizaron una propuesta para la combinación de sistemas de riego inteligentes optimizados que utilizan métodos para mejorar el rendimiento de la gestión energética en la agricultura basada en la IoT (Internet de las cosas). Los nodos de sensores de IoT que se utilizan en los sistemas de riego inteligentes para la agricultura son responsables de detectar y recopilar datos relacionados con la humedad, la temperatura, el suelo y los niveles del agua en la granja agrícola. Los datos recopilados en estos nodos se utilizan para supervisar el estado del sistema de producción agrícola y proporcionar acceso a usuarios distantes a través de un punto de acceso y un servidor en la nube. La mejora propuesta en el rendimiento de la gestión energética tiene como objetivo optimizar el uso de energía de estos nodos y prolongar la vida útil de la red, eliminando una gran cantidad de mensajes de alimentación, lo que mejora el rendimiento de los nodos y reduce el consumo de energía, al reducir el consumo de energía, mejora la velocidad de entrega de paquetes, la fiabilidad y el tiempo de cálculo.

De la misma forma (Bhavsar et al., 2023) analiza varios de estos sistemas inteligentes a través de sistemas IoT en dos tipos de riego, aspersión y goteo, comparando los resultados y eficiencia de cada uno, concluyendo que cada uno tiene sus ventajas y desventajas, dependiendo del objetivo principal, ya sea ahorro de energía o agua, así mismo que son replicables teniendo en cuentas las mismas condiciones de un cultivo a otro.

(Mercedes Garcia et al., 2022) analizaron otro tipo de mejora para los sistemas de riego inteligente, a través de un análisis termoeconómico proporcionaron información sobre la viabilidad económica de implementar mejoras que puedan apoyar los procesos de toma de decisiones de los

agricultores y las partes interesadas. Al considerar tanto los aspectos termodinámicos como los económicos, el análisis tuvo como objetivo identificar las estrategias óptimas de diseño y operación para el sistema de riego inteligente.

La optimización consistió en seleccionar y regular las cabezas de los clústeres (grupo de nodos de sensores de IoT que se seleccionan y regulan para realizar tareas específicas dentro de la red) entre los nodos de sensores en función de factores como la energía residual de los nodos y los centros de clústeres ideales. Al organizar los nodos en clústeres, la red puede lograr una mejor asignación de los recursos, la agregación de datos y la eficiencia de la comunicación. El enfoque de agrupamiento contribuye a ahorrar costos para los agricultores, a la sostenibilidad de la red de IoT y a mejorar la productividad en los sistemas agrícolas.

(Adamsab et al., 2021) diseñan un sistema de riego inteligente de bajo costo con un controlador de libre acceso, con medición de variables como la temperatura y la humedad mediante sensores, transmitiendo estos datos a la plataforma IoT para su análisis y control. Además, utilizan la energía solar y falaj³ de Omán para el riego, mediante la implementación de un sistema de generación de energía híbrido que utiliza un generador hidráulico y un panel fotovoltaico. Concluyeron que el monitoreo en línea a través de una aplicación móvil de IoT mejora el crecimiento de los cultivos, mostrando que el riego controlado aumenta la productividad y gestiona los recursos hídricos.

(Fernandez, 2016) realizaron una metodología para la rehabilitación de las redes de riego presurizado para determinar las compensaciones óptimas, teniendo en cuenta las inversiones (instalación) y los costos operativos a largo plazo. simulación para dos algoritmos (MONR y HMONR) aplicados a una red de riego, con el objetivo de apoyar las decisiones de rehabilitación óptimas de la red. Entre las recomendaciones del estudio se tienen las siguientes: control de puntos críticos (hidrantes con altos requerimientos de energía), optimización de las estaciones de bombeo asumiendo diferentes patrones de consumo de agua, disminución de las pérdidas de carga a la red

³ Sistema de riego con antiguos canales de agua del año 500 d. C que permite llevar el agua proveniente de manantiales y acuíferos situados en las montañas a través de túneles hasta las huertas.

para reducir el consumo de energía y sustituir las bombas antiguas (en este caso eran mayores de 25 años) por bombas nuevas de alta eficiencia.

(Bwambale et al., 2022) analizaron diferentes estudios que se enfocaban en estrategias de riego inteligente para mejorar la eficiencia del uso del agua, incluyendo métodos de monitoreo del suelo, el clima y las plantas, los cuales permiten realizar una programación optimizada del riego y tomar decisiones más acertadas con información en tiempo real del cultivo y según la necesidad de este. Analizaron estrategias de circuito abierto y cerrado, explicando la diferencia entre estos: donde el abierto, aplica una acción preestablecida como un temporizador para riego; el cerrado utiliza sensores que retroalimentan según la necesidad del cultivo y toman decisiones, siendo este último el de mejores resultados. En general, se observa que el uso de tecnologías o automatización del riego tiene múltiples beneficios en comparación con sistemas de riego convencionales o empíricos que no tienen en cuenta las diferentes variables del cultivo, el suelo y el clima.

(Rajanna et al., 2023) evaluaron la productividad, la efectividad de la energía y la huella de carbono (C) del sistema de soja-trigo bajo diferentes técnicas de labranza: camas planas con labranza cero (ZTFB), camas elevadas convencionales (CTRB) y camas convencionales. El estudio se hizo durante 3 años, en New Delhi, India, en parcelas de campo fijo utilizando un diseño de parcelas divididas con tres repeticiones.

Como resultados se tuvieron que el riego DASM 25 mejoró significativamente los rendimientos. Este se refiere a la práctica de aplicar el riego cuando la humedad disponible del suelo alcanza un 25% de agotamiento, tuvo un mayor rendimiento en comparación con otros niveles de riego, como el DASM del 50% y el DASM del 75%. Las camas elevadas con labranza convencionales (CTRB) mostraron una mayor productividad del sistema de cultivo, las camas sin labranza plana (ZTFB) con retención de residuos tenían una eficiencia energética y de C más baja.

Conclusiones

La implementación de sistemas de riego eficientes, como el riego por goteo o el riego por aspersión de alta eficiencia (presurizados), ofrece la posibilidad de optimizar el uso del agua y reducir el consumo energético asociado a la extracción y bombeo del agua. Además, la incorporación de tecnologías avanzadas, como la automatización, el monitoreo remoto y la telemetría, puede contribuir a optimizar los procesos agrícolas en general, incluyendo el riego, la iluminación y el consumo energético en tiempo real.

Varios autores, concluyen que la agricultura inteligente es un campo maduro que combina la tecnología y la experiencia de los agricultores para obtener buenos resultados en cuanto a eficiencia de agua y energía y se espera que los estudios futuros se centren en combinar sistemas con inteligencia artificial y macrodatos.

Otro aspecto relevante para considerar es el uso de fuentes de energía renovable, como paneles solares, para suministrar energía limpia a las operaciones de riego en la agricultura. Esto no solo puede reducir los costos asociados al consumo de energía eléctrica convencional proveniente de la red de distribución, sino también disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Aunque las prácticas de eficiencia energética en el riego agrícola ofrecen beneficios evidentes, su adopción generalizada se ve limitada por desafíos como los altos costos iniciales de implementación y la falta de políticas y marcos regulatorios adecuados.

Referencias

- Abrishambaf, O., Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2020). Agricultural irrigation scheduling for a crop management system considering water and energy use optimization. *Energy Reports*, 6, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.031>
- Adamsab, K., Saif, M., Saif, S., Khamis, I., & Talib, W. (2021). Hybrid powered intelligent irrigation system using Oman Falaj and solar energy. *Materials Today: Proceedings*, 41, 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.033>
- Alves Souza, S., & Neiva Rodrigues, L. (2022). Irrigation management zone strategies impact assessment on potential crop yield, water and energy savings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107349>
- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Optimization tool to improve the management of the leakages and recovered energy in irrigation water systems. *Agricultural Water Management*, 258, 107223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107223>
- Ayundyahrini, M., Danar Agus Susanto, Febriansyah, H., Fariz Maulana Rizanulhaq, & Gama Hafizh Aditya. (2023). Smart Farming: Integrated Solar Water Pumping Irrigation System in Thailand. *Evergreen*, 10(1), 553-563. <https://doi.org/10.5109/6782161>
- Benyezza, H., Bouhedda, M., & Rebouh, S. (2021). Zoning irrigation smart system based on fuzzy control technology and IoT for water and energy saving. *Journal of Cleaner Production*, 302, 127001. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127001>

- Benzaouia, M., Hajji, B., Mellit, A., & Rabhi, A. (2023). Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 215, 108407. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108407>
- Bhavsar, D., Limbasia, B., Mori, Y., Imtiyazali Aglodiya, M., & Shah, M. (2023). A comprehensive and systematic study in smart drip and sprinkler irrigation systems. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100303>
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
- Calero-Lara, M., López-Luque, R., & Casares, F. J. (2021). Methodological Advances in the Design of Photovoltaic Irrigation. *Agronomy*, 11(11), 2313. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112313>
- Cervera-Gascó, J., Montero, J., & Moreno, M. A. (2023). An intelligent irrigation management model for direct injection of solar pumping systems. *Agricultural Water Management*, 279, 108182. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108182>
- Chilundo, R. J., Carvalho, P. C. M., Diniz, M. M. N., & Bezerra, A. M. E. (2015). Photovoltaic powered irrigation system applied to familiar agriculture. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 95-100. <https://doi.org/10.24084/repqj13.249>
- Cremades, R., G S A Rothausen, S., Conway, D., Zou, X., Wang, J., & Li, Y. (2016). Co-benefits and trade-offs in the water–energy nexus of irrigation modernization in China. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054007>

- Fagodiya, R. K., Singh, A., Singh, R., Rani, S., Kumar, S., Rai, A. K., Sheoran, P., Chandra, P., Yadav, R. K., Sharma, P. C., Biswas, A. K., & Chaudhari, S. K. (2023). The food-energy-water-carbon nexus of the rice-wheat production system in the western Indo-Gangetic Plain of India: An impact of irrigation system, conservational tillage and residue management. *Science of The Total Environment*, 860, 160428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160428>
- FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura—Sistemas al límite*. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Fernandez, G. (2016, junio 8). OPTIMIZACIÓN DEL COSTE ENERGÉTICO EN REDES DE RIEGO A PRESIÓN MEDIANTE SU REHABILITACIÓN. *XXXIV Congreso Nacional de Riegos*. XXXIV Congreso Nacional de Riegos. <https://doi.org/10.21151/CNRiegos.2016.C17>
- Fernández García, I., González Perea, R., Moreno, M. A., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., & Rodríguez Díaz, J. A. (2017). Semi-arranged demand as an energy saving measure for pressurized irrigation networks. *Agricultural Water Management*, 193, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.025>
- Gurovich, L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego* (Primera). IICA Instituto Interamericano de Cooperacion para la agricultura.
- Haffaf, A., Lakdja, F., Meziane, R., & Abdeslam, D. O. (2021). Study of economic and sustainable energy supply for water irrigation system (WIS). *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 25, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100412>

- Handa, D., Frazier, R., Taghvaeian, S., & Warren, J. (2019). The Efficiencies, Environmental Impacts and Economics of Energy Consumption for Groundwater-Based Irrigation in Oklahoma. *Agriculture*, 9(2), 27. <https://doi.org/10.3390/agriculture9020027>
- Khan, A. I., Alsolami, F., Alqurashi, F., Abushark, Y. B., & Sarker, I. H. (2022). Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 104996. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104996>
- Kumar, M., Adake, R. V., Reddy, K. S., & Reddy, K. S. (2022). Development of green energy based micro-sprinkler irrigation system for small holdings of SAT region. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100433>
- Lankford, B. A. (2023). Resolving the paradoxes of irrigation efficiency: Irrigated systems accounting analyses depletion-based water conservation for reallocation. *Agricultural Water Management*, 287, 108437. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108437>
- Loureiro, D., Beceiro, P., Moreira, M., Arranja, C., Cordeiro, D., & Alegre, H. (2023). A comprehensive performance assessment system for diagnosis and decision-support to improve water and energy efficiency and its demonstration in Portuguese collective irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 275, 107998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107998>
- Mercedes Garcia, A. V., Sánchez-Romero, F. J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2022). A new optimization approach for the use of hybrid renewable systems in the search of the zero net energy consumption in water irrigation systems. *Renewable Energy*, 195, 853-871. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.060>

- Mindú, A. J., Capece, J. A., Araújo, R. E., & Oliveira, A. C. (2021). Feasibility of Utilizing Photovoltaics for Irrigation Purposes in Moamba, Mozambique. *Sustainability*, *13*(19), 10998. <https://doi.org/10.3390/su131910998>
- Muzammil, M., Zahid, A., & Breuer, L. (2021). Economic and environmental impact assessment of sustainable future irrigation practices in the Indus Basin of Pakistan. *Scientific Reports*, *11*(1), 23466. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02913-9>
- Navarro-González, F. J., Pardo, M. Á., Chabour, H. E., & Alskaf, T. (2023). An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *25*(6), 2009-2024. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02486-3>
- Ortiz Calle, R., Pazmiño Mayorga, J., & Chile Asimbaya, M. (2021). Eficiencias en el sistema de riego Tumbaco, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, *14*(1), 1-10. <https://doi.org/10.18779/cyt.v14i1.443>
- Pérez-Sánchez, M., Fernandes, J. F. P., Branco, P. J. C., López-Jiménez, P. A., & Ramos, H. M. (2021). PATs Behavior in Pressurized Irrigation Hydrants towards Sustainability. *Water*, *13*(10), 1359. <https://doi.org/10.3390/w13101359>
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F., Ramos, H., & López-Jiménez, P. A. (2017). Optimization Strategy for Improving the Energy Efficiency of Irrigation Systems by Micro Hydropower: Practical Application. *Water*, *9*(10), 799. <https://doi.org/10.3390/w9100799>
- Qiu, G. Y., Zhang, X., Yu, X., & Zou, Z. (2018). The increasing effects in energy and GHG emission caused by groundwater level declines in North China's main food production plain. *Agricultural Water Management*, *203*, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.003>

- Rajanna, G. A., Dass, A., Singh, V. K., Choudhary, Anil. K., Paramesh, V., Babu, S., Upadhyay, P. K., Sannagoudar, M. S., Ajay, B. C., & Viswanatha Reddy, K. (2023). Energy and carbon budgeting in a soybean–wheat system in different tillage, irrigation and fertilizer management practices in South-Asian semi-arid agroecology. *European Journal of Agronomy*, 148, 126877. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126877>
- Raza, F., Tamoor, M., & Miran, S. (2021). Socioeconomic and Climatic Impacts of Photovoltaic Systems Operating High-Efficiency Irrigation Systems: A Case Study of the Government Subsidy Scheme for Climate-Smart Agriculture in Punjab, Pakistan. *The 1st International Conference on Energy, Power and Environment*, 36. <https://doi.org/10.3390/engproc2021012036>
- Rodríguez-Díaz, J. A., Pérez-Urrestarazu, L., Camacho-Poyato, E., & Montesinos, P. (2011). The paradox of irrigation scheme modernization: More efficient water use linked to higher energy demand. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1000. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10>
- Singh, D. B., Mahajan, A., Devli, D., Bharti, K., Kandari, S., & Mittal, G. (2021). A mini review on solar energy based pumping system for irrigation. *Materials Today: Proceedings*, 43, 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.716>
- Singh, N., Ajaykumar, K., Dhruw, L. K., & Choudhury, B. U. (2023). Optimization of irrigation timing for sprinkler irrigation system using convolutional neural network-based mobile application for sustainable agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100305. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100305>

- Stambouli, T., Faci, J. M., & Zapata, N. (2014). Water and energy management in an automated irrigation district. *Agricultural Water Management*, 142, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.001>
- Sudharshan, N., Karthik, A. K., Kiran, J. S., & Geetha, S. (2019). Renewable Energy Based Smart Irrigation System. *Procedia Computer Science*, 165, 615-623. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.055>
- UN. (2023). *UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNITED NATIONS.
- Wang, Y., Zhao, Q., Wu, W., Willis, A., Simpson, A. R., & Weyer, E. (2022). Improved Pump Setpoint Selection Using a Calibrated Hydraulic Model of a High-Pressure Irrigation System. *IFAC-PapersOnLine*, 55(33), 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.012>
- Wanyama, J., Soddo, P., Nakawuka, P., Tumutegyereize, P., Bwambale, E., Oluk, I., Mutumba, W., & Komakech, A. J. (2023). Development of a solar powered smart irrigation control system Kit. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100273. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100273>
- Yousef, B. A. A., Amjad, R., Alajmi, N. A., & Rezk, H. (2022). Feasibility of integrated photovoltaic and mechanical storage systems for irrigation purposes in remote areas: Optimization, energy management, and multicriteria decision-making. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102363. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102363>
- Zeng, Y.-F., Chen, C.-T., & Lin, G.-F. (2023). Practical application of an intelligent irrigation system to rice paddies in Taiwan. *Agricultural Water Management*, 280, 108216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108216>

Zhang, Q., Ge, M., Wu, P., Wei, F., Xue, S., Wang, B., & Ge, X. (2023). Solar photovoltaic coupled with compressed air energy storage: A novel method for energy saving and high quality sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*, 288, 108496. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108496>

Zhang, Y., Ge, M., Zhang, Q., Xue, S., Wei, F., & Sun, H. (2023). What did irrigation modernization in China bring to the evolution of water-energy-greenhouse gas emissions? *Agricultural Water Management*, 282, 108283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108283>