DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026. ISSN 1909-2520 (Impreso), ISSN 2590-8219 (En línea)

Sistemas de riego a base de energía solar y eólica en Colombia. Una revisión de literatura

I. T. Jiménez Moreno; M. Muñoz Piza; J.A. Camacho Ospina; J.F. Avendaño Mancipe, G.A García Contreras

I. INTRODUCCIÓN

En Colombia, en muchas regiones del país, especialmente las semiáridas y aquellas con climas de alta variabilidad, enfrentan un desafío constante de acceso al recurso del agua para los cultivos que así lo requieren. En este sentido, en un futuro cercano, el uso de sistemas de riego que utilicen energías renovables será indispensable indiscutiblemente. Algunos de los principales beneficios de estos sistemas es que permiten disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y, por otro, mejorar el manejo de energía hídrica y el desarrollo agrícola sostenible.

Se realizó una revisión de la literatura y se logró analizar que, en diferentes bases de datos indexadas como Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect, se propone la viabilidad técnica, económica y medioambiental de estos sistemas en entornos rurales. Las conclusiones de estos estudios muestran que para aquellos lugares en los que la red eléctrica es de difícil acceso o no existe, los paneles solares aplicados a las bombas de agua y a las turbinas eólicas de poca potencia constituyen una gran alternativa [1]. Por otra parte, se ha comprobado que estos sistemas son una alternativa adecuada para garantizar el suministro de agua en áreas de alta insolación y de vientos medianos. Además, hacen parte de los requerimientos y características presentes en muchas zonas de Colombia [2].
Este estudio de revisión de literatura tiene como objetivo enseñar la viabilidad de un sistema de riego para la agricultura en Colombia; este sistema propondrá el uso de energía solar y eólica, disminuyendo los costos de operación y fomentando el uso de energías limpias.

Estudios realizados han explorado la tendencia del país, señalando que Colombia es un territorio con gran potencial para la energía solar, con promedios de energía solar superiores a 4,5 kWh / m^2 / día, con zonas donde el clima es muy optimo donde se llegaría a aprovechar la energía eólica como por ejemplo en la región del caribe colombiano y en algunas regiones de los Andes [3]. Recientemente han visualizado cómo implementar estos sistemas en zonas con alto potencial tanto solar como eólico, mostrando que pueden ayudar a reducir costos operativos y mejorar la productividad agrícola. Por lo tanto, esta revisión tiene como objetivo ofrecer una percepción más clara sobre la situación actual de las energías renovables para riego en Colombia, destacando los avances tecnológicos y los retos que aún se deben enfrentar en su implementación. El uso de un sistema de riego sostenible a partir de la energía solar y eólica disponible en Colombia es hoy en día algo innovador; entonces, se realizará su respectivo análisis de fundamentos técnicos, experiencias piloto, beneficios posibles y desafíos, para que sirva de base para investigaciones de mayor profundidad, donde se formulen lineamientos de política pública y propuestas de un desarrollo tecnológico orientado al fortalecimiento en el sector agropecuario nacional.

II. RESUMEN

Este estudio de revisión literaria explora la viabilidad y las ventajas, vinculadas al uso de sistemas de riego impulsados por la energía renovable en las regiones rurales de Colombia. El estudio señala la gran capacidad de estas innovaciones para mejorar en mayor medida el uso del agua, disminuir la gran dependencia de fuentes de energía no renovables y reducir los gastos vinculados con los métodos de riego que actualmente se están utilizando.

Para llegar a este análisis detallado, se llevaron a cabo diversas búsquedas que incluyeron un examen minucioso de bases de datos académicas relevantes, documentos de agencias gubernamentales y sitios de renombre. El objetivo principal de este estudio fue explorar a fondo la situación actual del uso de energía renovable para el riego en Colombia, identificando tanto los avances logrados como los obstáculos que aún persisten y que deben superarse para lograr su implementación en nuestro país.

Los resultados de este estudio dan evidencia del creciente interés por estas nuevas alternativas y métodos ecológicos, como lo demuestra el aumento constante en la producción académica relacionada con las energías limpias. Asimismo, estos hallazgos destacan la gran oportunidad que tiene Colombia para aprovechar sus abundantes recursos de energía solar y eólica en la agricultura, lo que podría transformar radicalmente la forma en que se riegan los cultivos en todo el país.

III. OBJETIVO DEL ESTUDIO

El principal objetivo es proponer un sistema de riego generado a partir de energías solar y eólica, específicamente destinado a las áreas rurales de Colombia en las que la energía eléctrica no se encuentra ampliamente distribuida. La idea es hacer uso de los recursos naturales asociados a las energías limpias para mejorar el aprovechamiento del agua en la agricultura, reducir los costos de operación e impactar positivamente al medio ambiente y contribuir al desarrollo sostenible del campo colombiano.

IV. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En las últimas décadas, la preocupación por las repercusiones ambientales de las actividades humanas ha promovido la generación de fuentes de energía renovable, especialmente la energía solar y eólica. Estas fuentes representan opciones beneficiosas para reducir la demanda de combustibles fósiles y minimizar el cambio climático [4], [5].

Diferentes análisis han indicado que estas tecnologías han experimentado una evolución considerable, logrando niveles de eficiencia que habilitan su uso en áreas productivas como la agropecuaria [1], [6], [7], [8]. En este ámbito, se han creado soluciones de energía ecológica para tareas como el ordeño y otras prácticas de la ganadería, con el objetivo de disminuir la huella de carbono y los gastos energéticos [9], [10].

En Colombia, la ganadería es una actividad económica de gran importancia, sin embargo, también implica importantes efectos ambientales, como la deforestación, la erosión del suelo y la polución de fuentes de agua [11], [12]. En este contexto, la implementación de tecnologías sustentables se propone como una estrategia esencial para progresar hacia una producción más sustentable. El Programa de la ONU para el Medio Ambiente resalta la relevancia de tácticas preventivas en los procesos de producción para disminuir residuos y toxicidad [13].

También, el cambio climático ha impactado de manera significativa en la producción agrícola y ganadera. Se estima que para el año 2050 se requerirá un incremento del 70% en la producción global de alimentos, lo que generará una presión extra sobre los recursos naturales [14].

La energía solar ha demostrado considerables beneficios gracias a su accesibilidad y su reducido impacto en el medio ambiente. Esta tecnología transforma la energía solar en energía eléctrica, a través de paneles fotovoltaicos. Alrededor del 51% de la radiación solar que alcanza la Tierra tiene un impacto directo en la superficie de la Tierra, lo que la hace una fuente perfecta para usos agrícolas [15], [16].

Igualmente, la energía eólica ofrece beneficios significativos, su implementación genera electricidad limpia mediante generadores que se ajusten a la orientación del viento alcanzando rendimientos considerables y evitando arrojar cantidades significativas de CO_2 al medio ambiente [17], [18], [19].

En Colombia, parecen que tanto la energía solar como la eólica son opciones sustentables para el sector agropecuario [20]. Sin embargo, es imprescindible aplicar políticas públicas, capacitación comunitaria y financiación para fomentar su adopción, especialmente para los productores de pequeña y mediana escala [20], [21].

Respecto a los sistemas de riego, su aplicación en Colombia tiene sus raíces en la década de 1950, época en la que se regaban cerca de 50.000 hectáreas. Durante los años 1960 y 1990, la superficie irrigada aumentó en promedio 15.000 hectáreas anuales. En 1990, se estimaron 750.000 hectáreas bajo riego, que representaban el 10% del área de cultivo [22]. Pese a este aumento, la zona apropiada con infraestructura de riego tecnificada continúa siendo escasa: apenas un 6% del total con potencial [23].

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, liderando el Plan Nacional de Riego y Drenaje, propone una estrategia a largo plazo (2020–2039) para optimizar esta circunstancia. Se calcula que de las 39.2 millones de hectáreas de agricultura del país, 18.4 millones poseen potencial para ser irrigadas, sin embargo, solo 1.1 millones se encuentran actualmente equipadas [24], [25]. Esta información demuestra un gran potencial para la puesta en marcha de sistemas de riego propulsados por energías renovables en la nación.

V. METODOLOGÍA

Esta investigación fue elaborada mediante un enfoque de revisión documental y del análisis técnico mediante la cual se reunieron recomendaciones sobre el diseño, el

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026

funcionamiento y la aplicabilidad de un sistema de riego con energía solar y eólica en zonas agrícolas en el país. Este enfoque ofrece la posibilidad de analizar las experiencias y criterios previos que permitan una proposición sustentable y sostenible, ajustada a la realidad climatológica y rural de la región.

Primero, para la selección de la información a revisar, se tomaron en cuenta investigaciones y documentos técnicos que tratarán:

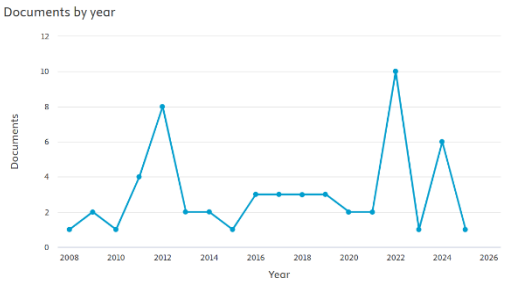
- Sistemas de riego por fuentes renovables,
- Condiciones climáticas en zonas rurales,
- Implementación de tecnologías de energía solar fotovoltaica y energía eólica aplicadas a entornos rurales.

A partir de esto, se realizaron la búsqueda de documentos en bases de datos académicas como Scopus, EBSCO, ProQuest y ScienceDirect, además de consultar informes de entidades gubernamentales y organizaciones internacionales como el IDEAM, el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la FAO y la ONU; es así cómo fue posible completar la información actualizada y específica del contexto colombiano [26], [27], [28], [29], [30].

Para la búsqueda del estudio se realizó seguimiento usando los siguientes conectores o palabras clave combinando términos relacionados como: sistema de riego, energía solar, energía eólica, sostenibilidad y eficiencia hídrica; extrayendo los documentos más relevantes y significativos encontrados. Luego, se llevó a cabo un análisis del contenido a fin de que se pudiera recopilar información acerca de los distintos sistemas, componentes técnicos, eficiencia energética, costos y gastos previstos, rendimiento y capacidad de ajustarse al clima de cada una de las regiones.

En el proceso de procesamiento de datos, se implementó un estudio bibliométrico fundamentado en los datos de Scopus, lo que facilitó la identificación de la progresión temporal de las publicaciones científicas vinculadas a sistemas de riego sustentables y energías renovables [31], [32].

Como se muestra en la Figura 1, la cantidad de publicaciones ha tenido un crecimiento gradual, con un incremento notable a partir del año 2021, este año se alcanzó el valor más alto, con 10 documentos relacionados, lo que indica un creciente interés en el uso de fuentes renovables en el sector agrícola.



Gráfica 1. Documentos publicados por año entre 2008 y 2025.

Este insumo permitió establecer lineamientos de un sistema híbrido de energía solar y eólica aplicado a riego por bombeo de aguas subterráneas de zonas con limitado acceso a redes eléctricas. Se han trabajado diagramas y esquemas del desarrollo del sistema híbrido partiendo de los componentes: fuentes de energía: paneles solares, aerogeneradores, reguladores de carga, baterías, bomba de agua y sistema de distribución. Los diagramas y esquemas fueron validados en virtud de estados de experiencias documentados en la literatura revisada [33], [34], [35]. Las conclusiones se agruparon en una propuesta metodológica para el diseño y la puesta en marcha del sistema de riego sostenible, en un contexto colombiano y sobre la base de energías limpias.

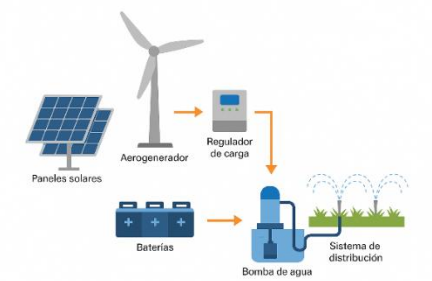


Figura 1. Diagrama conceptual de un sistema de bombeo de agua alimentado por energías renovables.

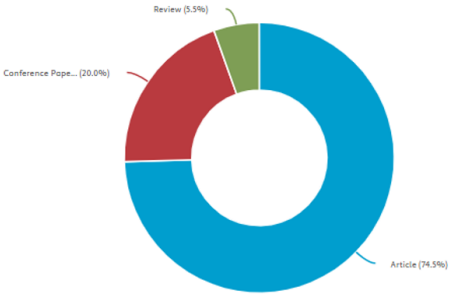
La revisión de la investigación se organizó mediante una base construida en el programa Microsoft Excel, en la que se anotaron datos importantes de cada uno de los documentos revisados: el título, los autores, el año de publicación, palabras clave, país, institución a la que se asocia, tipo de documento y campo de estudio. Esta herramienta permitió reconocer tendencias en la producción académica y técnica relacionada con sistemas de riego sostenibles que operan con fuentes de energía renovable, con un enfoque en su aplicación en zonas rurales de América Latina, especialmente en Colombia.

Para esta recopilación se consultaron bases de datos como Scopus, EBSCO, ProQuest y ScienceDirect, así como documentos técnicos emitidos por entidades como el IDEAM, la FAO, la UPME y el Ministerio de Minas y

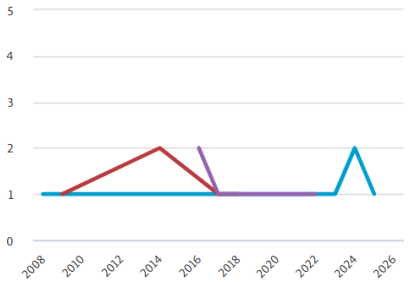
Energía. La búsqueda se diseñó mediante el uso de conectores lógicos que combinaron términos clave como “solar energy”, “wind power”, “irrigation system”, “renewable energy”, “sustainability” y “rural agriculture”.

Características generales de los documentos

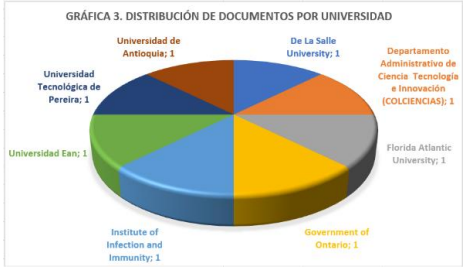
En relación con el contenido de los documentos encontrados, el 74.5% fueron de tipo científico, seguidos por el 20.0% de exposiciones en conferencias y el 5.5% de revisiones. Esta distribución señala que el tema ha sido abordado mayormente desde la investigación académica oficial, lo que demuestra un interés en aumento por soluciones sustentables para el sector agrícola en zonas con acceso limitado a la red de electricidad.



Gráfica 1. Distribución por tipo de documento

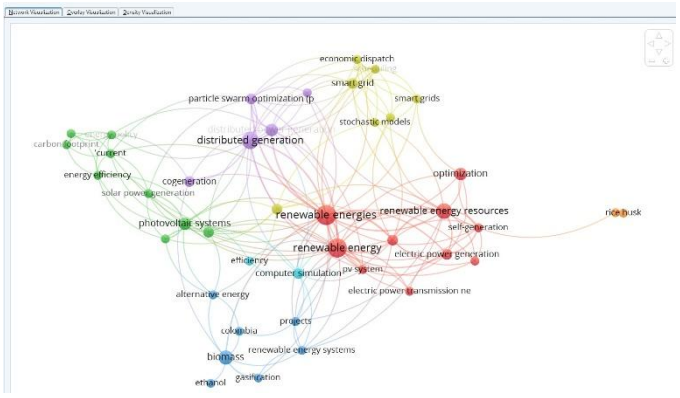


Gráfica 2. Distribución por año por recurso



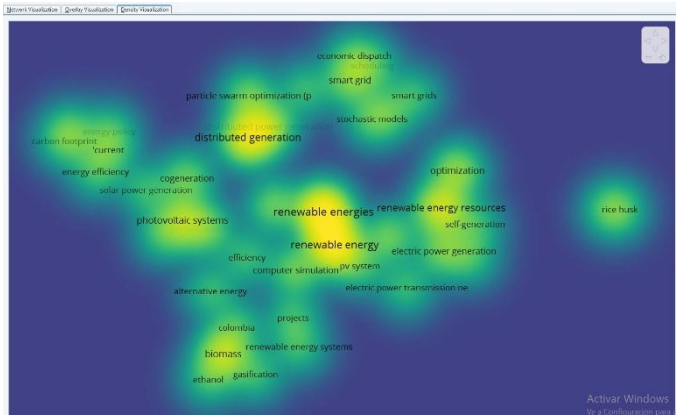
Gráfica 3. Distribución por Organización

Se identificó una participación equitativa de las siguientes universidades y entidades, cada una con un documento: Universidad de Antioquia, De La Salle University, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), Florida Atlantic University, Government of Ontario, Institute of Infection and Immunity, Universidad Ean y Universidad Tecnológica de Pereira.



Gráfica 4: Análisis de coocurrencia de palabras clave del título

Se puede evidenciar cómo se conectan varios conceptos importantes en el sector energético dónde cada forma redonda (nodo) simboliza un término, y el tamaño del círculo puede mostrar con qué frecuencia ocurre. Las líneas que vinculan los puntos muestran con qué frecuencia ocurren esos términos en las mismas situaciones mientras que los tonos de los puntos ayudan a detectar grupos de sujetos conectados, lo que permite observar cómo están vinculadas ideas como "energía sostenible", "generación distribuida", "optimización" y "Biomasa" En pocas palabras, es un diagrama que enfatiza los vínculos clave entre los conceptos en el sector energético, lo que permite el reconocimiento de zonas de estudio de investigación o temas recurrentes.



Gráfica 5: Análisis de Coocurrencia de Palabras Clave en mapa de calor

Y por último podemos ver un mapa de calor de palabras clave sobre energía. Los puntos dorados nos indica dónde los términos (como "fuentes de energía sostenibles") se encuentran con más frecuencia. Las regiones sombreadas (azules) muestran una frecuencia menor. Esto nos ayuda a poder reconocer los temas principales y las conexiones entre los conceptos en el sector energético, y aún más importante, esta representación gráfica identifica los temas clave y los vínculos más significativos entre los términos. Ya que las regiones pobladas muestran las ideas más importantes o la combinación de ideas que aparecen a menudo en la información base, dando un vistazo rápido a los puntos principales en el campo de la energía.

VI. RESULTADOS

La necesidad de optimizar el uso de los recursos hídricos en el sector agrícola colombiano se ha convertido en un tema crucial debido a factores ambientales, sociales y económicos que afectan directamente la sostenibilidad del país. La escasez de agua en zonas rurales, especialmente en regiones semiáridas y de alta variabilidad climática, ha evidenciado las limitaciones de los sistemas de riego convencionales, los cuales dependen en gran medida de fuentes de energía no renovables y de infraestructura limitada. Ante este panorama, el presente estudio de revisión literaria se enfocó en explorar el potencial de sistemas de riego impulsados por fuentes de energía solar y eólica; tecnologías que prometen no solo eficiencia energética, sino también la disminución de la huella ambiental de la actividad agrícola.[3],[27].

La revisión se desarrolló mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos indexadas ya mencionadas anteriormente tales como: Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect, con el fin de analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos sistemas en entornos rurales colombianos. En el contexto global, la transición hacia energías renovables responde tanto a compromisos internacionales de mitigación del cambio climático como a necesidades internas de fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas ante fenómenos meteorológicos extremos. En este sentido, el aprovechamiento del potencial solar y eólico que ofrece el territorio colombiano se presenta como una alternativa estratégica, especialmente en aquellas áreas donde la red eléctrica es inexistente o poco confiable.

Así, el objetivo fundamental de esta revisión no solo fue evaluar las tecnologías disponibles y sus aplicaciones prácticas, sino también identificar los retos y barreras que podrían obstaculizar su implementación, ofreciendo una base sólida para la formulación de estrategias de intervención y políticas públicas orientadas al desarrollo agropecuario sostenible. Además, se quiere fomentar la discusión académica y técnica sobre la necesidad de integrar soluciones sostenibles en las zonas rurales del país. [36],[37], [38], [39].

Potencial técnico de las energías renovables para sistemas de riego en Colombia

Energía solar

Colombia gracias a su ubicación geográfica cuenta con uno de los niveles de irradiación solar más altos, lo que convierte a la energía solar fotovoltaica en una opción excepcionalmente viable para aplicaciones agrícolas. De acuerdo con los datos reportados por el IDEAM, los niveles promedio de irradiancia oscilan entre 4,5 y 6,0 kWh/m²/día en regiones estratégicas como la Orinoquía, el Caribe y varias zonas de la región andina. Esta disponibilidad constante de energía solar durante prácticamente todo el año asegura la continuidad en el funcionamiento de sistemas de riego impulsados por paneles fotovoltaicos, incluso en épocas de baja irradiación.[40].

El uso de sistemas solares para riego no es una novedad a nivel internacional; sin embargo, su adopción en Colombia aún no es tan aplicable. Los avances tecnológicos en la eficiencia de los paneles solares, actualmente superiores al 20% en muchos casos, junto con la reducción progresiva de los costos de instalación y mantenimiento, han incrementado su atractivo para comunidades rurales. Además, las nuevas generaciones de controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) permiten maximizar la captación de energía en condiciones de variabilidad climática, optimizando la producción energética a lo largo del día. [41].

Un aspecto clave identificado en la literatura revisada es que los sistemas solares permiten integrar tecnologías de riego eficiente, como el riego por goteo o microaspersión, reduciendo así las pérdidas de agua por evaporación y percolación. Este doble beneficio energético e hídrico refuerza la oportunidad de apostar por soluciones solares en el sector agropecuario. No obstante, es importante resaltar que la eficiencia de los sistemas solares depende de factores técnicos como el correcto dimensionamiento del sistema, el mantenimiento preventivo de los paneles, y la incorporación de soluciones de almacenamiento energético para garantizar el suministro continuo en condiciones de nubosidad o durante la noche.[35],[42],[43].

Energía eólica

Si bien la energía solar presenta claras ventajas, la energía eólica también ofrece oportunidades relevantes, particularmente en regiones de Colombia donde las condiciones de viento son favorables. La región de La Guajira, por ejemplo, registra velocidades de viento promedio que superan los 9 m/s, posicionándose como una de las zonas de mayor potencial eólico de América Latina. Además, existen áreas en la costa Caribe y algunos sectores andinos donde la velocidad del viento alcanza valores entre 4 y 6 m/s, niveles suficientes para operar microaerogeneradores diseñados para entornos rurales.

El aprovechamiento de la energía eólica para sistemas de riego es especialmente útil para complementar la generación solar, formando sistemas híbridos que aprovechan diferentes condiciones meteorológicas a lo largo del año [1], [6]. La variabilidad estacional del viento puede equilibrar los periodos de menor radiación solar, aumentando así la fiabilidad energética de los sistemas de bombeo de agua. Esto resulta crítico en zonas donde los patrones climáticos presentan alta intermitencia, permitiendo mantener la operación continua de los sistemas de riego incluso bajo condiciones desfavorables.

Desde el punto de vista tecnológico, los avances en el diseño de aerogeneradores de baja potencia han mejorado su eficiencia, reduciendo la velocidad de corte (velocidad mínima de viento necesaria para comenzar a generar electricidad) y aumentando su tolerancia a condiciones ambientales extremas. Por otro lado, la implementación de soluciones de control inteligente permite integrar la producción eólica y solar de forma optimizada, gestionando automáticamente la carga energética de acuerdo con la disponibilidad de cada fuente. [44].

Es importante mencionar que la instalación de sistemas eólicos implica ciertos desafíos técnicos y sociales, como la necesidad de realizar estudios de viento previos, la aceptación comunitaria de las estructuras, y la capacitación técnica en mantenimiento de los equipos. Sin embargo, los beneficios en términos de independencia energética, reducción de costos operativos y sostenibilidad ambiental superan ampliamente estos desafíos, especialmente cuando se consideran en el marco de estrategias de desarrollo rural. [45]

Análisis de Viabilidad Económica

La viabilidad económica de los sistemas de riego impulsados por energías renovables es un aspecto fundamental para evaluar su aplicabilidad real en los entornos rurales colombianos. La revisión literaria evidencia que, si bien el costo inicial de implementación de tecnologías como paneles solares fotovoltaicos o aerogeneradores de baja potencia es relativamente alto en comparación con las tecnologías tradicionales basadas en diésel o electricidad de red, estos sistemas presentan costos operativos significativamente menores a largo plazo. De acuerdo con los datos recopilados, la inversión inicial promedio en un sistema de riego solar en Colombia oscila entre los $ 6′000.000 de pesos y $12′000.000 de pesos por hectárea irrigada, dependiendo de factores como la profundidad del pozo, el tipo de bomba, la infraestructura de distribución del agua, y la calidad de los componentes del sistema. [51].

Tabla 1. Costos estimados por componentes para un sistema de riego solar/eólico en 3 hectáreas.

Componentes	**Descripción**	**Precio aproximado (COP)**
Paneles solares (9000 Wp)	30 paneles de 300W	$32.000.000
Bomba solar sumergible trifásica (5 HP)	Gran caudal, profundidad hasta 60 metros	$19.000.000
Controlador de carga MPPT industrial	Alta capacidad, multientrada	$4.000.000
Inversor híbrido trifásico DC-AC	Para grandes sistemas	$6.500.000
Banco de baterías (8x 200Ah)	Almacenamiento energético para 1 día completo	$10.500.000
Torre y turbina eólica grande (3000 W)	Soporte energético extra	$14.000.000
Sistema de tuberías reforzadas	PVC alta presión, válvulas automáticas industriales	$10.200.000

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026

Componentes	Descripción	Precio aproximado (COP)
6 Sensores de humedad del suelo	Medición multizona para control automático	$2.400.000
3 Sensores de presión	Monitoreo de flujo constante	$1.400.000
2 Sensores de temperatura ambiental	Gestión inteligente de clima	$800.000
Cableado industrial y protecciones eléctricas	Mayor capacidad, breakers industriales	$3.000.000
Bases y anclajes estructurales reforzados	Soporte ampliado	$3.500.000
Caja de control de monitoreo avanzado	Conexión remota, app móvil	$3.200.000
Mano de obra especializada (equipo de 4 técnicos)	Diseño, instalación, configuración	$9.000.000
Otros consumibles	Tubos extra, selladores, conectores	$2.500.000

Costo total para 3 hectáreas:
≈ $122.000.000

Tabla 2. Comparativa detallada entre sistema de riego solar/eólico y sistema tradicional diésel/eléctrico (para 3 hectáreas).

Concepto	Sistema Solar/Eólico (3 hectáreas)	Sistema Tradicional Diésel/Eléctrico (3 hectáreas)
Costo de instalación inicial (COP)	$111.500.000	$45.000.000 (diésel) / $50.000.000 (eléctrico)
Costos de operación anual (COP)	$500.000 (mantenimiento preventivo mínimo)	$24.000.000 - $30.000.000 (combustible, energía)
Vida útil promedio del sistema	20-25 años	6-8 años
Renovación principal	Solo baterías (cada 8-10 años)	Motor nuevo, reparaciones frecuentes cada 3-5 años
Costos de renovación en 10 años	$10.000.000 (solo baterías)	$60.000.000 (repuestos, mantenimiento de motores)
Emisiones de carbono (CO_2)	Cero emisiones (100% limpio)	Altísimas (dependencia de combustibles fósiles)
Dependencia de combustibles	Ninguna (energía solar y eólica gratuita)	Alta (precio del diésel o tarifa eléctrica variable)
Riesgo de interrupción	Muy bajo (fuentes renovables independientes)	Alto (escasez de diésel, cortes de energía eléctrica)
Costo total aproximado en 10 años	≈ $122.000.000	≈ $285.000.000

Concepto	Sistema Solar/Eólico (3 hectáreas)	Sistema Tradicional Diésel/Eléctrico (3 hectáreas)
Sostenibilidad ambiental	Excelente	Muy baja
Sostenibilidad económica	Muy alta (recupera inversión en 5-6 años)	Muy baja (costos crecientes cada año)

El aspecto económico más relevante identificado es que, una vez cubierto el costo de instalación, los sistemas solares o híbridos presentan costos de operación prácticamente nulos, ya que el sol y el viento son recursos energéticos gratuitos e inagotables. Este contraste con los sistemas tradicionales, que dependen del constante consumo de combustibles fósiles, se traduce en un ahorro estimado de hasta el 80% en los costos operativos anuales. Además, los costos de mantenimiento de los sistemas renovables son considerablemente más bajos debido a la menor cantidad de piezas móviles en los sistemas solares y a la creciente robustez de los aerogeneradores modernos.

Otro factor económico por considerar es el periodo de retorno de la inversión. Los estudios analizados muestran que, bajo condiciones óptimas de funcionamiento y adecuada gestión, los sistemas solares y/o híbridos se sitúa entre los 4 y 6 años. Este periodo puede ser incluso más corto si se consideran subsidios gubernamentales, incentivos fiscales o líneas de financiamiento verde que ya existen en algunos programas nacionales e internacionales de apoyo al desarrollo rural sostenible.

Cabe señalar que, a pesar de las ventajas económicas a mediano y largo plazo, la barrera de acceso al capital inicial sigue siendo un reto importante para los pequeños y medianos productores rurales, que a menudo carecen de acceso a créditos favorables o garantías suficientes. Este hallazgo recalca la necesidad de diseñar instrumentos financieros específicos, adaptados a las condiciones socioeconómicas del sector agropecuario colombiano, que faciliten la transición hacia sistemas de riego renovables.

Evaluación de Impactos Ambientales

La incorporación de sistemas de riego basados en energías renovables tiene implicaciones ambientales y sociales sumamente positivas, lo cual refuerza su pertinencia como estrategia de desarrollo sostenible. En términos ambientales, uno de los impactos más relevantes es la significativa reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Al sustituir bombas de agua alimentadas por motores diésel o electricidad fósil por sistemas solares o eólicos, se evita la emisión anual de aproximadamente 1,2 toneladas de CO_2 por sistema instalado, contribuyendo directamente a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático.[46], [47].

Además, al reducir la dependencia de los agricultores de los combustibles fósiles, disminuye su vulnerabilidad frente a las fluctuaciones de los precios en el mercado internacional del petróleo, lo que fortalece su resiliencia económica. De este modo, los pequeños y medianos productores pueden destinar más recursos a mejorar sus cultivos, infraestructura y calidad de vida, en lugar de enfrentar elevados costos operativos relacionados con la energía.

VII. Conclusiones

En conclusión, gracias a la revisión literaria se logró ver que sistemas de riego sostenibles que utilicen energía solar y eólica es una estrategia clave con un enorme potencial para mejorar el manejo del agua en Colombia. Esto no solo fomentará un desarrollo agrícola sostenible y resiliente, sino que también ayudará de manera significativa a alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático, tanto a nivel nacional como internacional. Para que esto suceda, es esencial un esfuerzo coordinado y una colaboración cercana entre diferentes actores, incluyendo al gobierno, las instituciones académicas, entes investigativos, el sector privado y, por supuesto, las comunidades rurales, que son las que más se beneficiarán de estas soluciones innovadoras.

Referencias

[1] Z. A. Khan, M. Imran, A. Altamimi, O. E. Diemuodeke, and A. O. Abdelatif, “Assessment of Wind and Solar Hybrid Energy for Agricultural Applications in Sudan,” *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 5, 2021. doi: 10.3390/en15010005

[2] “El tratamiento de agua potable mediante energías renovables en Colombia,” Ambiente Soluciones, 2022. [Online]. Available: https://www.ambientesoluciones.com/portal/noticias-de-

actualidad/el-tratamiento-de-agua-potable-mediante-energias-renovables-en-colombia

[3] *"Perspectivas y tendencias del panorama energético colombiano,"* Atlas Renewable Energy, 2025. [Online]. Available: https://es.atlasrenewableenergy.com/perspectivas-y-tendencias-del-panorama-energetico-colombiano/

[4] Departamento Nacional de Planeación (DNP), *"Energía renovable en Colombia: resolver el trilema energético,"* 2024. [Online]. Available: https://www.dnp.gov.co/publicaciones/Planeacion/Paginas/energia-renovable-en-colombia-resolver-el-trilema-energetico.aspx

[5] *"Energías renovables en Colombia: avances para la transición energética,"* Ambiente & Sociedad, 2023. [Online]. Available: https://www.ambienteysociedad.org.co/energias-renovables-en-colombia-avances-para-la-transicion-energetica/

[6] J. A. Cuéllar Bolaños, W. Ortiz, and R. Bhandari, "Techno-Economic Feasibility Study of Solar and Wind Based Irrigation Systems in Northern Colombia," *Proceedings of the 4th World Sustainability Forum*, 2014. [Online]. Available: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/year/2015/docId/5737

[7] J. J. Espitia, F. A. Velázquez, J. Rodriguez, L. Gomez, E. Baeza, C. E. Aguilar-Rodríguez, J. Flores-Velazquez, and E. Villagran, "Solar Energy Applications in Protected Agriculture: A Technical and Bibliometric Review of Greenhouse Systems and Solar Technologies," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, Art. no. 2791, Nov. 2024. doi: 10.3390/agronomy14122791

[8] Juliana Yomayusa Ibarra, "Sistemas Agrivoltaicos en cultivos de tomate Chonto en Boyacá: evaluación energética y ambiental," Pontificia Universidad Javeriana, Tesis de Maestría en Energía y Sostenibilidad, 2022. [Online]. Available: https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/63590

[9 *"Por qué el ganadero debe usar paneles solares en su finca,"* Contexto Ganadero. [Online]. Available: https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/por-que-el-ganadero-debe-usar-paneles-solares-en-su-finca

[10] M. El Zein y G. Gebresenbet, "Investigating off-grid systems for a mobile automated milking facility," *Heliyon*, vol. 7, n.º 4, e06630, Apr. 2021. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06630

[11] C. Díaz Cárdenas, *Evaluación de impacto ambiental y ganadería extensiva en Colombia*, Ministerio de Cultura, Archivo General de la Nación, Bogotá, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.2715

[12] M. A. Mora Marín, L. Ríos Pescador, L. Ríos Ramos, and J. L. Almario Charry, "Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia," *Ingeniería y Región*, vol. 17, p. 1, 2017. doi: 10.25054/22161325.1212

[13] Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, "Política Nacional de Producción Más Limpia", Colombia,1997. https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/produccion-y-consumo-sostenible/.

[14] IDEAM "El IDEAM presenta nuevas proyecciones climáticas para Colombia: escenarios de cambio climático al 2050," 2025. https://ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/el-ideam-presenta-nuevas-proyecciones-climaticas-para-colombia-escenarios-de-cambio-climatico-al.

[15] *"Moisture in the Atmosphere,"* CliffsNotes. [Online]. Available: https://www.cliffsnotes.com/study-guides/earth-science/weather/moisture-in-the-atmosphere

[16] *"Mapeo solar de Colombia: una herramienta clave para optimizar la energía fotovoltaica,"* OPS Colombia. [Online]. Available: https://www.opscolombia.com/blog/mapeo-solar-de-colombia

[17] J. P. Jaramillo-Cardona, J. C. Perafán-López, J. L. Torres-Madroñero, C. Nieto-Londoño y J. Sierra-Pérez, "Techno-economic assessment of small wind turbines under La Guajira-Colombia resource conditions," *CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 12, no. 1, pp. 45-56, 2022, doi: 10.29047/01225383.400.

[18] F. A. Barrozo Budes, "Energy, Economic, and Environmental Evaluation of a Proposed Solar-Wind Power On-grid System Using HOMER Pro®: A Case Study in Colombia," *Energies*, vol. 13, no. 7, p. 1662,

2020. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.12834/788

[19] A. Solarte-Cortés et al., "Scenarios for wind capacity deployment in Colombia by 2050: A perspective from system dynamics modeling," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 6, p. 100096, Feb. 2025. doi: 10.1016/j.rset.2024.100096 sciencedirect.com

[20] J. Vega Araújo y M. Muñoz Cabré, "Solar and Wind Power in Colombia: 2022 Policy Overview," SEI Brief, 2023. doi: 10.51414/sei2023.015.

[21] R. E. Reyes Gil, Á. Turriago-Hoyos, M. Cárdenas Piñeros, y J. P. Danna Buitrago, "Análisis de Políticas Públicas para la adopción de Energías Renovables No Convencionales en Colombia," *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, vol. 19, no. 36, pp. 1–9, Feb. 2023. doi: 10.18270/cuaderlam.v19i36.4052

[22] "Historia del riego en Colombia: tendencias pasadas y actuales en suelos agrícolas bajo riego," *Wikipedia – Irrigation in Colombia* (adaptada de FAO y datos oficiales), 2025.

[23] *"1.8 millones de hectáreas tendrán riego tecnificado al 2039,"* Contexto Ganadero. [Online]. Available: https://www.contextoganadero.com/agricultura/18-millones-de-hectareas-tendran-riego-tecnificado-al-2039

[24] *"MinAgricultura aprobó un nuevo Plan Nacional de Riego para los próximos 20 años,"* Agronegocios, 27 abr. 2021. [Online]. Available: https://www.agronegocios.co/agricultura/minagricultura-aprobo-un-nuevo-plan-nacional-de-riego-para-los-proximos-20-anos-3129899

[25] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), *"Resolución 311 de 2020: Plan Nacional de Riego y Drenaje 2020–2039,"* Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020. [Online]. Available: https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Resoluciones/RESOLUCI%C3%93N%20NO.%20000311%20DE%202020.pdf

[26] L. S. Rodríguez Beltrán, "Los sistemas fotovoltaicos frente a la problemática energética de las zonas rurales de Colombia," *ResearchGate*, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/371627156_Los_sistemas_fotovoltaicos_frente_a_la_problematica_energetica_de_las_zonas_rurales_de_Colombia

[27] Stockholm Environment Institute, *"Energía solar y eólica en Colombia: panorama y resumen de 2022,"* 2023. [Online]. Available: https://www.sei.org/publications/energia-solar-eolica_colombia-2022/

[28] FAO/AGRIS, *"Estado actual, inventario y futuros prospectos de la energía solar fotovoltaica en Colombia,"* [Online]. Available: https://agris.fao.org/search/en/providers/124912/records/67bc9b217a9727816ad324d4

[29] The Nature Conservancy, *"Barreras y oportunidades para el reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe,"* 2021. [Online]. Available: https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/barrerasreuso.pdf

[30] UPME, *"Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima 2024–2038,"* Revisión diciembre 2023. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Proyeccion_demanda_energia_electrica_y_potencia_maxima_rev_jul2024.pdf

[31] S. L. Guavita Beltrán, *La sostenibilidad con enfoque en energía renovable en la agricultura: revisión sistemática de literatura en la base de Scopus entre los años 2013 y 2023*, Trabajo de grado, Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Bogotá, 2023. [Online]. Available: https://repository.uniagraria.edu.co/bitstreams/8ec99b94-9a7d-4be1-83d4-1428be71983b/download

[32] F. Plazas Niño *et al*., "Towards a sustainable energy matrix in Colombia: A systematic literature review," *Información Tecnológica*, vol. 35, no. 5, pp. 1–12, 2024. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v35n5/0718-0764-infotec-35-05-1.pdf

[33] A. A. López Cardona, *Diseño de un sistema híbrido eólico solar para el bombeo de agua*, Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2016. [Online]. Available: https://repositorio.utp.edu.co/entities/publication/b55e97b8-e0cf-4ec1-b549-c3ed2e7cdaa0

[34] J. D. Rivas Casarrubia, "Implementación de un sistema de bombeo de agua, alimentado con energía solar en la Universidad de Córdoba – Colombia," *Vestigium Ire*, vol. 15, no. 1, pp. 105–120, 2021. [Online]. Available: https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ivestigium/article/view/2375

[35] N. Castellanos Sierra, *"Estudio técnico económico de un sistema de bombeo haciendo uso de la energía solar para riego por gravedad de un cultivo de arroz,"* Trabajo de grado, Universidad de Ibagué, 2021. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.12313/4952

[36] M. A. Fernández-Muñoz, J. Montes-Pérez, J. J. Salas and E. Palacios-González, "Methodology to assess the implementation of renewable energy in the agrifood industry in Colombia," *Renewable Energy*, vol. 217, pp. 1183–1197, 2023. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.005

[37] J. A. Cerón, E. Gómez-Luna, y J. C. Vásquez, "Impulsando la transición energética en Colombia para regiones aisladas: Microrredes y fuentes de energía renovables no convencionales," *Energías*, vol. 18, art. 1010, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.3390/en18041010

[38] "Innovación Sostenible: Biogás de la UAN Mejora la Calidad de Vida en Zonas Rurales de Colombia," *Asociación Colombiana de Universidades – ASCUN*, 11 jul. 2024. [Online]. Available: https://ascun.org.co/noticias/noticias-ies/innovacion-sostenible-biogas-de-la-uan-mejora-la-calidad-de-vida-en-zonas-rurales-de-colombia

[39] A. Valverde Granja, G. A. Vargas Galván, M. García Arboleda y J. E. Díaz Figueroa, "Impact of the Implementation of a Solar Energy Irrigation System on Lemon Crops," *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, vol. 14, no. 2, pp. 90–107, 2022. doi: 10.22335/rlct.v14i2.1571

[40] Holland & Knight, *"Colombia Has High Potential for Renewable Energy,"* Mar. 2021. [Online]. Available: https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2021/03/colombia-has-high-potential-for-renewable-energy

[41] J. A. Cepeda y A. Sierra, *"Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,"* Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible en: https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2631

[42] Intagri, *"Sistema de riego por goteo,"* 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.intagri.com/articulos/agua-riego/sistema-de-riego-por-goteo

[43] Agencia de Noticias UNAL, *"Crean sistema de riego que funciona con energía solar,"* Universidad Nacional de Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/crean-sistema-de-riego-que-funciona-con-energia-solar

[44] J. A. Rangel Acevedo, *"Estudio de aerogeneradores de baja velocidad,"* Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, 2013. [En línea]. Disponible en: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3494/ESTUDIO%20DE%20AEROGENERADORES%20DE%20BAJA%20VELOCIDAD.pdf

[45] F. Eraso-Checa, E. Escobar-Rosero, D. F. Paz y C. Morales, "Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño," *Revista Científica*, vol. 31, no. 1, pp. 19–31, 2018. doi: 10.14483/23448350.12304

[51] *Agronegocios*, "Los puntos que debe tener en cuenta para instalar riego artificial," *Agronegocios*, 23 mar. 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.agronegocios.co/tecnologia/los-puntos-que-debe-tener-en-cuenta-para-instalar-riego-artificial-2844262

[46] XM, *"En Colombia: factor de emisión de CO_2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado,"* 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado

[47] Enel Green Power, *"Planta fotovoltaica El Paso, Colombia: puesta en marcha,"* 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2019/04/planta-fotovoltaica-el-paso-colombia-puesto-marcha

Figura 1. Departamento de Energía de EE. UU., "Sistemas híbridos," ResearchGate, 2007. https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Sistemas-

hibridos-Tomado-del-Departamento-de-Energia-de-EEUU-2007_fig12_323704103.

Tabla 1. Costos estimados por componentes para un sistema de riego solar/eólico en 3 hectáreas. Elaboración propia con apoyo de ChatGPT, modelo de lenguaje de OpenAI. https://chat.openai.com.

Tabla 2. Tabla II. Comparativa detallada entre sistema de riego solar/eólico y sistema tradicional diésel/eléctrico (para 3 hectáreas). Elaboración propia con apoyo de ChatGPT, modelo de lenguaje de OpenAI. https://chat.openai.com.

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026