



Diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Autores:

Cristo Jesús Naranjo Charris

Alfonso Cedith Zamora Padilla

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2026



Diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Proyecto de Investigación como prerrequisito para la obtención del título de:
Ingeniero Ambiental

Autores:

Cristo Jesús Naranjo Charris

Alfonso Cedith Zamora Padilla

Asesores:

Sofia Sulbaran Siado

Javier Burgos Vergara

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2026

Dedicatoria

Dedico este logro a mi padre, **Leonel de Jesús Naranjo**, gracias por creer siempre en mí y por brindarme la oportunidad de formarme y convertirme en profesional. Cada uno de los esfuerzos que hiciste para apoyarme en cada semestre hoy se ve reflejado en este logro, que también es tuyo. Más que un apoyo económico, has sido un ejemplo de vida. Me has enseñado el valor de la humildad, el trabajo honesto y el amor incondicional por la familia.

A mi madre, **Eris María Morales**, gracias por estar siempre a mi lado, especialmente en los momentos en los que más me sentí agotado. Tu apoyo incondicional, tus oraciones y tus palabras de aliento fueron la fuerza que me impulsó a seguir adelante. Gracias por cada consejo, por cada conversación que me ayudó a reflexionar, a madurar y a encaminar mis pasos para hacer las cosas bien.

A mi pareja, **Andrea Puerta**, gracias por ser mi apoyo incondicional en cada etapa de este camino. Llegaste a mi vida para llenarla de sentido y propósito, y junto a ti encontré una familia maravillosa, conformada por Avita y Zuco, quienes se han convertido en una fuente constante de amor y felicidad.

Dedico este logro a mi padre, Alfonso Zamora Núñez por su guía y apoyo que me brindo en cada momento aconsejándome a cada paso que daba para poder alcanzar la mejor versión de mí
Y a mi madre Marbel Luz Padilla Villafañe, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional que hizo posible Este triunfo que es tan suyo como mío.

También a Andrea Puerta, gracias por tu, tu apoyo y por ser parte fundamental en la realización de este trabajo. Tu ayuda fue invaluable.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra tutora, **Sofía Sulbarán**, por su invaluable orientación, dedicación y apoyo constante a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado. Su compromiso académico, paciencia y disposición fueron fundamentales para la culminación de esta investigación.

De igual manera, extendemos nuestra gratitud a nuestro asesor, **Javier Burgos**, por sus valiosas recomendaciones, conocimientos compartidos y acompañamiento durante este proceso. Su aporte contribuyó significativamente al fortalecimiento de este proyecto.

A ambos, gracias por su tiempo, guía y confianza.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
1. Estado del arte.....	15
1.1 Innovación en sistemas de riego por goteo.....	16
1.2 Energía solar como fuente para el riego.....	17
1.3 Riego por goteo como tecnología eficiente.....	18
1.4 Innovación y automatización en el riego sostenible.....	18
1.5 Evolución de tecnologías de riego de agua automatizado por energía fotovoltaica.....	19
2. Planteamiento del problema.....	22
3. Justificación.....	24
4. Objetivos.....	27
4.1 Objetivo general.....	27
4.2 Objetivos específicos.....	27
5. Marco legal.....	28
6. Marco Teórico.....	32

6.1 La energía fotovoltaica.....	32
6.2 Sistema de riego por goteo.....	33
6.3 Sostenibilidad hídrica.....	31
6.4 Antecedentes.....	34
6.5	Bases
teóricas.....	35Ma
7. Marco metodológico.....	37
7.1 Enfoque y tipo de investigación.....	37
7.2 Diseño metodológico	37
7.3 Materiales y técnica.....	38
7.4 Población y muestra.....	38
7.5 Procedimiento.....	40
7.6 Análisis de datos.....	40
7.7 Consideraciones éticas y ambientales.....	41
8. Resultados.....	42
9. Discusión.....	63
10. Limitaciones del estudio.....	65
11. Conclusión.....	66
Referencias.....	68

Lista de Tablas

Tabla 1. *Normatividad*

internacional 28

Tabla 2. *Normatividad Nacional*.....30

Tabla 3. *Normatividad regional y local*.....31

Tabla 4. *Evaluación del tratamiento del sistema de riego por goteo*.....45

Tabla 5. *Proyección inicial del consumo del sistema de riego por goteo*.....45

Tabla 6. *Proyección del consumo energético del sistema de riego por goteo*.....46

Tabla 7. *Categorías principales y emergentes del análisis de las encuestas etnográficas*.....53

Tabla 8. *Análisis del desempeño del prototipo*.....62

Lista de Diagramas

Diagrama 1. *Proceso Cuantitativo*.....37

Diagrama 1. *Proceso Cualitativo*.....37

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Prototipo de riego por goteo.....</i>	42
Figura 2. <i>Distribución del sistema de riego por goteo en el área experimental.....</i>	43
Figura 3. <i>Prototipo experimental del sistema de riego por goteo.....</i>	47
Figura 4. <i>Sistema de riego por goteo mediante panel solar.....</i>	48
Figura 5. <i>Sistema de bombeo del prototipo de riego por goteo.....</i>	49
Figura 6. <i>Sistema de distribución hidráulica del sistema de riego por goteo.....</i>	50
Figura 7. <i>Implementación del cultivo experimental.....</i>	51
Figura 8. <i>Sistema de riego por goteo finalizado.....</i>	52

Resumen

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo diseñar un prototipo de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica, con el fin de optimizar el uso sostenible del agua en pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico. La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando un componente experimental para la construcción y evaluación del sistema, y un componente cualitativo basado en encuestas etnográficas aplicadas a agricultores de la región.

El prototipo fue diseñado con componentes de bajo costo, integrando un panel solar, una bomba de baja potencia, un sistema de distribución por goteo y un tanque de almacenamiento, logrando un caudal aproximado de 12 L/h. Los resultados evidenciaron una reducción significativa en el consumo de agua, estimándose entre un 60 % y un 85 % frente a sistemas tradicionales, así como la eliminación del uso de combustibles fósiles.

Desde el análisis cualitativo, se identificó una alta dependencia de métodos tradicionales de riego, caracterizados por baja eficiencia y alto esfuerzo físico, pero también una aceptación favorable hacia tecnologías automatizadas con energía solar. Se concluye que el prototipo representa una alternativa viable, sostenible y adaptable para mejorar la eficiencia hídrica y energética en la agricultura de pequeña escala.

Abstract

The objective of this thesis was to design a prototype of an automated, photovoltaic-powered drip irrigation system, with the aim of optimizing the sustainable use of water in small-scale farms in the department of Atlántico. The research was conducted using a mixed-methods approach, combining an experimental component for the construction and evaluation of the system with a qualitative component based on ethnographic surveys administered to farmers in the region.

The prototype was designed using low-cost components, integrating a solar panel, a low-power pump, a drip distribution system, and a storage tank, achieving an approximate flow rate of 12 L/h. The results showed a significant reduction in water consumption, estimated at between 60% and 85% compared to traditional systems, as well as the elimination of fossil fuel use.

Qualitative analysis identified a high dependence on traditional irrigation methods, characterized by low efficiency and high physical effort, but also a favorable acceptance of automated solar-powered technologies. It is concluded that the prototype represents a viable, sustainable, and adaptable alternative for improving water and energy efficiency in small-scale agriculture.

Introducción

La agricultura de pequeña escala es un pilar de la seguridad alimentaria en América Latina, especialmente en Colombia. La escasez de agua, la disminución de los niveles freáticos, los cambios en los patrones de lluvia y el aumento de los precios de los combustibles fósiles ponen de manifiesto la ineficiencia de los modelos agrícolas tradicionales, sobre todo en los países en desarrollo. En este contexto, la agricultura de pequeña escala es, responsable de más del 70 % de la producción alimentaria, es particularmente vulnerable, ya que sus agricultores a menudo carecen de acceso a tecnologías modernas, financiación suficiente y asistencia técnica adecuada para satisfacer sus necesidades (Howell, 2001).

En el departamento del Atlántico, ubicado en la región caribe de Colombia, estas tensiones estructurales se expresan con particular intensidad. La región se caracteriza por un régimen bimodal de lluvias, con periodos secos prolongados que pueden extenderse varios meses, temperaturas medias superiores a los 28 °C y una evapotranspiración elevada que incrementa de forma significativa la demanda hídrica de los cultivos, en este sentido, según el Plan de Desarrollo Departamental del Atlántico 2024-2027, más del 60 % de las unidades productivas rurales del departamento continúan operando con métodos de riego tradicionales o dependiendo exclusivamente de la precipitación estacional, lo que las expone de manera directa a la variabilidad climática y limita su capacidad de planificación agrícola (Gobernación del Atlántico, 2024).

Dada la escasez de agua, el acceso limitado y los altos costos, estas pérdidas no solo dañan el medio ambiente, sino que también impactan directamente la productividad de los cultivos. El cambio climático reducirá el uso de agua para riego en gran parte de la región del Caribe colombiano en las próximas décadas, lo que agravará la situación y hará urgente la transición a tecnologías que optimicen el uso de cada litro de agua disponible (Sierra, 2021).

Esta dependencia energética limita no solo la implementación de sistemas de riego mecanizados, sino también la adopción de tecnologías de monitoreo, automatización y control que podrían transformar radicalmente la eficiencia de las prácticas agrícolas. Así, la combinación de ineficiencia hídrica y precariedad energética configura un escenario de doble vulnerabilidad que perpetúa el rezago tecnológico del pequeño productor rural frente a las exigencias de la agricultura moderna y sostenible (Mahindawansha et al., 2020).

En este contexto, la combinación de sistemas automatizados de riego por goteo y energía solar se presenta como una de las soluciones tecnológicas más prometedoras. El riego por goteo, al suministrar agua directamente en la zona radicular de la planta, reduce las pérdidas por evaporación y escorrentía superficial, logrando una eficiencia hídrica del 80% al 95%, superando con creces los métodos tradicionales (Scholten, 2024). Además, la energía solar ofrece una alternativa renovable, limpia y económicamente viable a la electricidad en zonas rurales donde el acceso a la energía es limitado o inexistente.

La evolución tecnológica de estos sistemas ha sido notable en la última década. Desde las primeras experiencias con bombeo solar en comunidades rurales aisladas motivadas fundamentalmente por la ausencia de redes eléctricas convencionales, los sistemas de riego fotovoltaico han avanzado

hacia configuraciones cada vez más sofisticadas que integran algoritmos de control digital, sensores multiparamétricos, aplicaciones móviles de monitoreo remoto y, más recientemente, herramientas de inteligencia artificial para la predicción de la demanda hídrica (Capcha et al., 2025).

La oportunidad del presente proyecto se fortalece, además, por el fuerte marco normativo que a nivel internacional, nacional y regional respalda el desarrollo de tecnologías de riego eficiente y de energías renovables para el sector rural, por lo tanto, se reconoce explícitamente la necesidad de incorporar tecnologías limpias, eficientes y sostenibles en el sector rural, alineando los objetivos institucionales del departamento con los propósitos técnicos y ambientales de este trabajo de grado.

En respuesta a todas estas consideraciones, el presente trabajo de grado propone el diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica, orientado a las pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico. El prototipo integra un panel solar de baja potencia como fuente de energía autónoma, una bomba sumergible de bajo voltaje para el suministro de agua, un sistema de distribución por goteo con filtrado y control de flujo, y sensores de soporte para la evaluación experimental del desempeño del sistema. El diseño ha sido concebido bajo criterios de bajo costo, accesibilidad tecnológica, adaptabilidad a las condiciones climáticas locales y facilidad de replicación por parte de comunidades rurales sin formación técnica especializada, factores que determinan, en última instancia, la verdadera utilidad social de cualquier innovación tecnológica en contextos de vulnerabilidad.

1. Estado del Arte

En los últimos años, los diversos de sistemas de riegos por goteo que han sido alimentados con energía solar fotovoltaica han sido estudiados como un proceso sostenible para la agricultura de pequeña escala, no obstante, las investigaciones coinciden en que el riego por goteo puede presentar una eficiencia hídrica hasta del 80% y del 95% superando los métodos tradicionales (gravedad o aspersión) cuya eficiencia oscila entre el 40% y 70%, demostrando unas diferencias en el mejoramiento del rendimiento agrícola (Howell, 2001; Scholten, 2024).

Asimismo, desde investigaciones recientes como las de Bawa et al., (2023), evidencian reducciones en costos del 30% y hasta el 50% implementando energía fotovoltaica, esto evidencia que la integración de energía renovable es viable en contextos agrícolas de pequeña escala, de manera similar diversos estudios de Asia, África y América Latina muestran que la energía solar permite independencia energética y reducción de emisiones frente al cambio climático.

Abdelhamid et al., (2025), reportan reducciones simultaneas en el consumo de agua y energía cercanas al 28% cuando se incorporan sistemas inteligentes de control, esto demuestra que la eficiencia hídrica no depende únicamente del método de riego, sino también del monitoreo y la gestión del tiempo real. Por lo tanto, pese a estos avances la literatura evoca algunos vacíos importantes ya que, se desarrollan condiciones controladas o como lo presentan otros estudios los altos costos iniciales limitan su replicabilidad en comunidades rurales de bajos recursos, incluso

en el contexto colombiano, la evidencia empírica se concentra mas en estudios de viabilidad económica más que en prototipos experimentales.

En relación con lo anterior se identifican indifferencias metodológicas entre investigaciones: mientras algunos autores priorizan el análisis económico (Martínez, 2021), otros se enfocan en el dimensionamiento técnico del sistema (Méndez, 2023) o en la automatización digital (Capcha et al., 2025). Esta diversidad evidencia la consolidación tecnológica del riego solar, pero también muestra la ausencia de enfoques integrales que combinen bajo costo, automatización y adaptación territorial específica.

En síntesis, es importante detallar mucho más las revisiones de literatura que evidencian como los sistemas de riego solar fotovoltaico representan una solución técnica viable y ambientalmente sostenible, por ende, se presentan las siguientes perspectivas:

1.1 Innovación en sistemas de riego por goteo:

A partir de diversos estudios se ha podido destacar la gran eficiencia que se desarrolla a través del riego por goteo, y es que, al optimizar el consumo de agua y poder garantizar una provisión constante en cultivos sensibles, según Vargas y Valverde (2022), demuestran que la implementación de este proceso ayuda a mejorar el rendimiento agrícola ya que, al reducir la evaporización de la percolación profunda, se puede desenvolver como una alternativa sostenible frente al riego por aspersión. Es importante tener en cuenta, que se señala que el riego por goteo automatizado responde a diversas necesidades de poder modernizar los sistemas tradicionales, completando un control digital para mejorar esa eficiencia operativa (Paz y Echarri, 2022).

En América Latina, Según Márquez et al., (2024), evidencian diversas experiencias en las que el cálculo de las necesidades Hídricas permitió concordar con exactitud la frecuencia del riego,

lo que de una u otra forma demuestra el potencial del goteo automatizado para pequeños y hasta mediados agricultores, por ende, se puede considerar que este proceso es una de las tecnologías más relevantes para la agricultura debido a su capacidad de aumentar la productividad de los cultivos y sobre todo, en la disminución de pérdidas por evaporación, permitiendo ajustar dinámicamente la distribución del agua.

1.2 Energía solar como fuente para el riego:

A diferencia de los sistemas tradicionales que se utilizaban con gran frecuencia en tiempos remotos (gravedad o aspersión), el goteo suministra agua de manera mucho más localizada en la zona radicular, por ende, según Howell (2001), en términos de eficiencia, diversos estudios evidencian que este sistema puede alcanzar un 80% y un 95% de mucha más eficiencia en la aplicación del agua, cifra que supera el riego por gravedad ya que este solo demuestra entre un 40% y un 50%, lo mismo sucede con la aspersión, donde su máximo alcance revela alrededor de un 60 a un 70%, no obstante, las innovaciones en este campo se han orientado específicamente a la automatización, la integración con energías renovables y con ello, la digitalización de procesos agrícolas.

Por lo tanto, la energía solar fotovoltaica ha sido aplicada muy ampliamente en el bombeo de agua para riego, ya que según Bawa et al., (2023), a partir de 82 estudios que realizaron, concluyen que los sistemas de bombeo solar reducen entre un 30% y hasta un 50% los costos operativos frente al diésel que utilizan con los otros métodos. En síntesis, la incorporación de la energía solar en estos sistemas representa una innovación sostenible especialmente en contextos rurales y de bajos recursos, ya que, al ofrecer independencia energética y reducciones de los contaminantes, estos constituyen un desarrollo social y económico en comunidades agrícolas, generando como posibilidad una transición energética y una adaptación al cambio climático.

1.3 Riego por goteo como tecnología eficiente:

El riego por goteo es una innovación clave para la gestión hídrica agrícola, puesto que, esta aplica agua directamente de la zona radicular de las plantas, lo cual disminuye diferentes pérdidas que se pueden generar por la evaporización. Según Scholten (2024), se ha demostrado que en países como México o Israel la eficiencia de este método alcanza entre un 80% y 95%, por ende, el goteo se ha convertido en una política de Estado, demostrando diversos impactos positivos en la productividad.

En Colombia, se destaca que este mismo proceso es aún incipiente, ya que se siguen implementando métodos antiguos, sin embargo, su adopción se ha dado más que todo en cultivos de café, hortalizas y caña panelera, pero su uso es limitado ya que el costo inicial de las instalaciones sobre pasa la economía de estos agricultores, esta brecha, por lo tanto, justifica el diseño de prototipos de bajo costo con ayuda de energías renovables (Rodríguez y Ramírez, 2020).

Diversos proyectos en países como la India, Chile y Marruecos han incorporado sistemas de goteos controlados por aplicaciones móviles y conectándose a dispositivos de internet, que les permite a estos agricultores monitorear en tiempo real la humedad que se pueda estar presentando, ayudando con esto en las necesidades hídricas del cultivo (Bawa et al., 2023). Estas innovaciones han podido evocar que este método no solo es una herramienta de eficiencia hídrica, sino también un componente funcional en las estrategias de adaptación del cambio climático, en este sentido, el riego por goteo ha dejado de ser únicamente una técnica de ahorro de agua y se ha convertido en un plan integral de innovación agrícola.

1.4 Innovación y automatización en el riego sostenible:

La integración de un sistema de riego automatizado con energía sostenible ha evocado una solución muy prometedora para optimizar el uso del agua en contextos agrícolas de pequeña escala, no obstante, la literatura científica de los últimos años evidencia un creciente interés por este proceso, motivado por la necesidad de reducir aquellas dependencias de energías completamente convencionales, que de una u otra forma, desarrolla más gastos y no promueve una buena práctica sostenible (Pineda, 2024).

Esta aproximación sistemática ha sido adoptada y refinada por múltiples investigadores posteriores, consolidándose como el estándar metodológico en el campo, puesto que, la metodología ha evolucionado hacia enfoques más sofisticados, como el “método del peor mes” introducido por Méndez (2023), para garantizar la operabilidad continua del sistema incluso en condiciones de baja irradiancia. La diversidad de configuraciones de sistema responde a diferentes contextos operacionales y restricciones económicas, ya que, los sistemas de accionamiento directo, sin almacenamiento energético, han demostrado ser económicamente óptimos para aplicaciones de mayor escala, confirmando que, para granjas de 2 y 3 hectáreas, estos sistemas minimizan tanto el costo presente neto como la inversión inicial, utilizando bombas AC de velocidad variable acopladas a arreglos fotovoltaicos fijos (Scholten, 2024).

La integración de este tipo de sistemas ha demostrado actualmente beneficios sinérgicos significativos en términos de eficiencia hídrica, estudios de Abdelhamid et al., (2025), documentaron reducciones bárbaras de hasta un 28,1%, tanto de consumo de agua como de energía, puesto que, cuando se comparan sistemas inteligentes basados en sensores de humedad del suelo, esta optimización se traduce a una automatización de sensores de humedad que demuestras que la implementación de sistemas de IoT permite mantener los niveles de suelo

húmedo dentro de los rangos óptimos, habilitando estrategias de riego predictivo que mejoran la eficiencia operacional.

1.5 Evolución de tecnologías de riego de agua automatizado por energía fotovoltaica:

La evolución de este tipo de tecnologías ha incorporado una gran transformación en operaciones agrícolas, Capcha et al., (2025), destaca que, esta aplicación en contextos rurales, responden a las exigencias del siglo XX, ya que el aprovechamiento de paneles solares en la alimentación de bombas de agua se centraba en comunidades aisladas frente a la falta de redes eléctricas convencionales, estos sistemas solares y a los costos de inversión, restringía gradualmente su adopción masiva.

En la actualidad, los sistemas de riego con energía solar se relacionan en el desarrollo de sensores de humedad, lo que posibilita una gestión más precisa de los recursos hídricos, estos sistemas, además de garantizar una buena suministro de agua, optimizan su uso al adaptarse en tiempo real de las condiciones edafoclimáticas, reduciendo con ello, pérdidas por evaporación o incluso, filtración (Márquez et al., 2024).

La literatura analizada sugiere que los sistemas de riego solar fotovoltaico han alcanzado un gran nivel tecnológico, que se justifica en su implementación comercial en condiciones específicas, aun cuando la optimización sigue siendo necesaria en otras dimensiones, incluso si hablamos de algoritmos de inteligencia artificial para predicciones de demandas hídricas y hasta optimizaciones energéticas, este proceso podría abordarse actualmente con esta inteligencia lo que ayudaría tanto en la variabilidad climática como en la eficiencia operaciones, ya que el desarrollo de configuraciones hídricas podría mitigar la variabilidad estacional, mientras que la evolución

impactaría mucho más en una mejor eficiencia y un menor costo que podría mejorar la accesibilidad económica.

El estado actual del arte, demuestra una tecnología en proceso de consolidación que ha revelado una viabilidad técnica y económica bajo condiciones específicas, la evidencia científica confirma que estos sistemas representan una alternativa viable para promover la sostenibilidad agrícola, específicamente en regiones de alta radiación solar y de acceso limitado a infraestructura eléctrica, no obstante, la adopción exitosa requiere consideraciones cuidadosas, incluyendo la escala de operación, disponibilidad de capital inicial y de capacidades técnicas para el desarrollo de un futuro más viable en el campo.

2. Planteamiento del problema

En el departamento del Atlántico, los pequeños agricultores enfrentan múltiples desafíos que dificultan su productividad y sostenibilidad, entre los cuales destacan dos problemas críticos como la ineficiencia en el uso del agua y la inestabilidad en el suministro de energía, estos factores no solo comprometen la producción agrícola, sino que también aumentan los costos operativos, reduciendo la rentabilidad del trabajo en el campo, por lo tanto, esta situación es aún más crítica en zonas con escasez de agua o con infraestructuras deficientes (Gobernación del Atlántico, 2024).

Según diversos estudios, más del 60 % de las unidades productivas de pequeña escala en Colombia continúan utilizando métodos de riego tradicionales o dependen de la precipitación estacional, lo que genera baja eficiencia en el uso del recurso hídrico. En estos sistemas, la eficiencia puede oscilar entre el 40 % y el 70 %, presentándose pérdidas significativas por evaporación y escorrentía superficial, especialmente en climas cálidos (Howell, 2001).

Los sistemas de riego tradicionales utilizados por diversos productores de pequeña escala son poco eficientes, lo que provoca una pérdida considerable de agua, en gran parte del recurso hídrico se desperdicia debido a la evaporación superficial, a una distribución deficiente del agua y a la filtración en suelos no adecuados o sin mantenimiento, por lo tanto, esta situación es

especialmente preocupante en zonas con escasez hídrica o en aquellas donde el acceso al agua es limitado o costoso (Sierra, 2021).

Al mismo tiempo, es importante resaltar que la falta de tecnologías adecuadas y de formación técnica en prácticas de riego eficientes contribuye a que el recurso no se utilice de forma óptima, generando un uso excesivo que no desarrolla realmente una mayor productividad agrícola. Por otro lado, el acceso a energía confiable y asequible continúa siendo un obstáculo importante, ya que, en muchas regiones rurales, la conexión a la red eléctrica es limitada o inexistente, y las alternativas disponibles, como los generadores a base de diésel u otros combustibles fósiles, resultan costosas y poco sostenibles a largo plazo (Valverde, 2022).

Estudios recientes han señalado que la combinación de estos factores genera un círculo vicioso, ya que poseen sistemas ineficientes y dependen mucho de energía cara, por ende, la mayoría de los agricultores no pueden aprovechar las ventajas de tecnologías agrícolas modernas, lo cual influye negativamente en la producción de cultivos y con ello, a medida que disminuye la eficiencia del riego, aumenta el gasto energético, lo que también incrementa los costos generales de producción (Mahindawansha et al., 2020).

Aunque la literatura científica internacional demuestra que los sistemas de riego por goteo alimentados con energía fotovoltaica pueden reducir entre un 30 % y 50 % de los costos convencionales, así como mejorar la eficiencia en el uso del agua, en el departamento del Atlántico no se evidencian suficientes prototipos experimentales de bajo costo adaptados a condiciones locales y orientados a pequeños productores., lo que prevé mayores desafíos asociados a la sostenibilidad energética y necesidad de adaptación tecnológica en el sector rural (Valverde et al., 2022).

En este contexto, resulta fundamental promover soluciones sostenibles que aborden ambos problemas de manera simultánea, como el uso de energías renovables, la implementación de tecnologías de riego más accesibles y la capacitación técnica para los agricultores, esto con el fin de reducir costos de operación y aumentar resistencia frente a los cambios climáticos, ya que estas medidas pueden contribuir significativamente a mejorar la eficiencia en el uso del agua y la energía.

3. Justificación

El desarrollo de un prototipo de sistema de riego alimentado con energía solar ofrece una solución a la necesidad de optimizar el uso sostenible del agua y garantizar el suministro de energía en las pequeñas áreas agrícolas, ya que, debido a la ineficiencia de los sistemas de riego tradicionales, los agricultores se enfrentan actualmente a importantes retos, como la pérdida de agua por evaporación, la distribución desigual y la infiltración en suelos inadecuados (Sierra, 2021).

En el departamento del Atlántico, ubicado en la región caribe colombiana, las condiciones climáticas tienden a estar marcadas por altas temperaturas y periodos de lluvias y recurrentes sequías, factores que evidentemente incrementan la evaporación y reducción del proceso efectivo de los recursos hídricos para la agricultura. No obstante, desde el Plan de Desarrollo Departamental del Atlántico (2024–2027), se reconoce la necesidad de incorporar tecnologías limpias y eficientes en el sector rural, por lo tanto, adoptar este tipo de sistemas de riego alimentado por energía renovable evoca una oportunidad para implementar prototipos adaptados a las condiciones climáticas y socioeconómicas locales.

Además, la dependencia de fuentes de energías tradicionales, como el diésel o la red eléctrica, no solo aumenta los costos de producción, sino que también limita la autosuficiencia de las comunidades rurales, especialmente en regiones donde la infraestructura eléctrica es inadecuada o inexistente (Valverde et al., 2022). En este contexto, la producción de energía solar parece ser una alternativa sostenible que puede reducir los costes operativos hasta en un 50 % y contribuir a la independencia energética de los agricultores (Bawa et al., 2023).

Cuando se integra con sistemas automatizados y fuentes de energía renovable, el riego por goteo alcanza índices de eficiencia hídrica del 80 % al 95 %, superando significativamente a los métodos tradicionales, como el riego por gravedad o el riego con agua de lluvia (Howell, 2001; Scholten, 2024). Además, la experiencia reciente indica que la integración de estos sistemas con sensores de humedad y tecnología IoT permite un control y una predicción más eficiente de las necesidades de agua, lo que se traduce en un importante ahorro de agua y energía (Abdelhamid et al., 2025).

En Colombia, los sistemas de riego basados en la tecnología aún se encuentran en una fase inicial debido a los elevados costos de instalación, lo que da lugar a una brecha tecnológica que afecta directamente a la productividad agrícola, por consiguiente, es necesario promover soluciones de bajo costo para mejorar la sostenibilidad de las prácticas agrícolas locales, al tiempo que se integra la energía limpia (Rodríguez y Ramírez, 2020).

Asimismo, el desarrollo de un prototipo de riego alimentado con energía fotovoltaica en el Atlántico no solo responde a una necesidad ambiental, sino también a una oportunidad de innovación tecnológica con impacto socioeconómico. En este sentido, la construcción y evaluación de un prototipo de bajo costo permite generar conocimiento aplicado, validar su viabilidad técnica en condiciones locales y sentar bases para futuras escalas de implementación.

Por lo tanto, este proyecto no solo propone soluciones técnicamente viables, sino que también tiene como objetivo promover una transición hacia una agricultura más eficiente sostenible y accesible para los pequeños agricultores de la región caribe, puesto que, al integrar la innovación tecnológica, la eficiencia hídrica y las energías renovables, se contribuye a abordar retos como, la seguridad alimentaria y el acceso equitativo a los recursos productivos, lo que evoca un gran avance en los contextos agrícolas de pequeña escala.

En definitiva, la implementación de un sistema de riego automatizado alimentado con energía solar en el Atlántico no solo representa una innovación tecnológica accesible, sino también una estrategia clave para fortalecer la resiliencia del sector agrícola frente al cambio climático, la escasez hídrica y la desigualdad en el acceso a tecnologías, este tipo de soluciones integradas permiten mejorar la productividad de pequeños agricultores y avanzar hacia un modelo de desarrollo rural más justos.

4. Objetivos

Objetivos General

Diseñar un prototipo de sistema de riego alimentado por energía fotovoltaica para optimizar el uso sostenible del agua en unidades agrícolas de pequeña escala del departamento del Atlántico.

Objetivos específicos

-Determinar los requerimientos hídricos y energéticos del cultivo seleccionado mediante la estimación del caudal necesario, el consumo de agua y la demanda eléctrica del sistema de bombeo.

-Seleccionar los componentes técnicos necesarios para implementar el diseño del sistema de riego de agua alimentado por energía fotovoltaica en el departamento del Atlántico.

-Evaluar el desempeño del prototipo mediante la medición del ahorro de agua, el consumo energético y la viabilidad operativa en condiciones experimentales.

5. Marco Legal

La normativa internacional establecida en la Agenda 2030 y en el Acuerdo de París ofrece el marco orientador para el desarrollo de tecnologías sostenibles que reduzcan las emisiones de carbono y optimicen el uso de los recursos naturales, en este sentido, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6 y 7) promueven de una u otra forma el acceso al agua limpia y a las energías asequibles y no contaminantes, principios que sustentan la implementación del sistema fotovoltaico como fuente energética renovable.

La Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación, por su parte, refuerza la importancia del riego eficiente en territorios vulnerables, lo cual se refleja en la necesidad de diseñar un prototipo capaz de reducir las pérdidas de agua y aprovechar al máximo los recursos hídricos disponibles.

Tabla 1.

Normatividad internacional

Norma / Política	Descripción	Aplicación al proyecto
Agenda 2030 - Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015)	Promueve el uso sostenible del agua (ODS 6) y las energías limpias (ODS 7).	Fundamenta la necesidad de desarrollar sistemas agrícolas sostenibles y el uso de energía solar.
Acuerdo de París (2015)	Compromete a los países a reducir emisiones de carbono.	Justifica el uso de energía fotovoltaica en lugar de combustibles fósiles.

Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (1994)	Fomenta la gestión sostenible del agua y el suelo.	Refuerza la pertinencia del riego eficiente en zonas rurales.
---	--	---

Nota: Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En el contexto nacional, la Constitución Política de 1991 y la Ley 99 de 1993 proporcionan los fundamentos ambientales que legitiman la integración de tecnologías limpias en la producción agrícola, orientando el proyecto hacia la protección del ambiente y el uso racional de los recursos naturales, por lo tanto, La Ley 373 de 1997, crea el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), la cual incide directamente en la parte técnica del diseño del sistema de riego, ya que con ello, llega a establecer la obligación de desarrollar mecanismos que garanticen la optimización del recurso hídrico.

Por otra parte, cuando ya se habla de la Ley 1715 de 2014 se enfoca en la regulación de la incorporación de fuentes no convencionales de energía, como la solar fotovoltaica, dentro del sistema energético nacional, lo que respalda técnicamente el uso de paneles solares como fuente principal de alimentación del prototipo. Con ello, el Decreto 2811 de 1974 y la Resolución 1207 de 2014 establecen lineamientos sobre el manejo del agua y los vertimientos en actividades agrícolas, lo cual condiciona el diseño del sistema para asegurar que el proceso de riego no genere impactos negativos en el suelo ni en las fuentes hídricas.

El Decreto 2811 de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables, establece los principios generales para la protección y uso racional del agua en Colombia, por ende, lo que busca esta norma es destacar que cualquier sistema de riego debe garantizar que no se generen afectaciones a las fuentes hídricas ni sobreexplotación del recurso. Asimismo, leyes como la 373

de 1997, que crea el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), evoca directamente en la implementación de tecnologías que reduzcan pérdidas y optimicen el consumo hídrico en actividades productivas, incluyendo el sector agrícola, por lo tanto, la idea del sistema de riego se relaciona con los principios de eficiencia establecidos por la ley.

Asimismo, la Ley 1931 de 2018 impulsa la adopción de tecnologías innovadoras como estrategia de adaptación al cambio climático, lo que conecta con la dimensión técnica del proyecto orientada a reducir la dependencia de energías fósiles y promover la sostenibilidad rural.

Tabla 2.

Normatividad Nacional

Norma / Política	Descripción	Aplicación al proyecto
Constitución Política de Colombia (1991), Art. 79 y 80	Garantiza el derecho a un ambiente sano y promueve el uso racional de los recursos naturales.	Respaldar la implementación de tecnologías limpias en el sector agrícola.
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y estructura el Sistema Nacional Ambiental (SINA).	Base para la gestión sostenible del agua y las energías renovables.
Ley 373 de 1997	Establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).	Fundamenta el desarrollo del prototipo de riego eficiente.
Ley 1715 de 2014	Regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.	Justifica el uso de energía solar fotovoltaica en sistemas de riego.
Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables	Regula el uso del agua y la protección de los recursos naturales.	Establece principios para la gestión racional del recurso hídrico.
Ley 1931 de 2018	Establece directrices para la gestión del cambio climático.	Sustenta la importancia de la innovación tecnológica en la adaptación agrícola.
Resolución 1207 de 2014 (MinAmbiente)	Regula los vertimientos y usos del agua en actividades agrícolas.	Relevante para garantizar que el prototipo cumpla con normas ambientales.

Nota: República de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Gaceta

Constitucional No. 116 de 20 de julio de 1991.

A nivel regional, el Plan de Desarrollo Departamental del Atlántico (2024–2027) y los Planes de Acción Regional de la CRA promueven la transición energética y la gestión integral del recurso hídrico, integrando estos lineamientos en los objetivos de eficiencia y sostenibilidad del prototipo, estas políticas territoriales no solo enmarcan la pertinencia del proyecto, sino que también facilitan su articulación con las estrategias de desarrollo local y con la planificación ambiental del departamento.

Este plan de desarrollo prioriza el proceso energético y el fortalecimiento de la agricultura sostenible, por ende, en el contexto del proyecto se articulan las metas departamentales orientadas a modernizar el sector rural mediante tecnologías sostenibles, limpias y eficientes. Asimismo, desde los Planes de Acción de la CRA se establecen diversas metas relacionadas con la gestión integral del recurso hídrico y la adaptación del cambio climático, lo cual refuerza notablemente la pertinencia regional del sistema que se ha propuesto.

Tabla 3.
Normatividad regional y local

Norma / Política	Descripción	Aplicación al proyecto
Plan de Desarrollo Departamental del Atlántico (2024–2027)	Promueve la transición energética y el fortalecimiento de la agricultura sostenible.	Alinea el proyecto con los planes de desarrollo territorial.
Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Barranquilla	Define lineamientos para el uso del suelo y la protección de recursos naturales.	Vincula la ubicación del proyecto a políticas locales de sostenibilidad.
Planes de Acción Regional de la CRA (Corporación Autónoma Regional del Atlántico)	Establecen metas para la gestión del recurso hídrico y la adaptación al cambio climático.	Da marco institucional a la gestión del agua en la región.

Nota: Gobernación del Atlántico. (2024). *Plan de Desarrollo Departamental 2024–2027*

6. Marco Teórico

6.1 La energía fotovoltaica:

Se entiende como la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de celdas semiconductoras, por lo tanto, este tipo de energía se caracteriza por ser limpia, renovable y de bajo impacto ambiental, permitiendo el funcionamiento autónomo de sistemas en lugares donde el acceso a la red eléctrica es limitado (Bawa, 2023). Su aplicación en sistemas de riego ha facilitado la sustitución de fuentes convencionales de energía, como el diésel, reduciendo las emisiones contaminantes y los costos operativos.

Además, la energía fotovoltaica ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, consolidándose como una de las fuentes renovables más eficientes y adaptables a diversas condiciones geográficas, por ende, los avances en materiales semiconductores, como el silicio monocristalino y las celdas de perovskita, han incrementado su rendimiento energético y reducido los costos de instalación, facilitando su implementación en zonas rurales y agrícolas (Villalba, 2023).

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2024), los sistemas fotovoltaicos son especialmente ventajosos en regiones con alta radiación solar, como gran parte del territorio colombiano, donde pueden proveer energía continua y limpia para el bombeo de agua, la automatización de procesos agrícolas y el funcionamiento de sensores

ambientales, no obstante, este tipo de tecnología no solo disminuye la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático, promoviendo la autosuficiencia energética y el desarrollo rural sostenible.

6.2 Sistema de riego por goteo:

Este concepto, constituye una técnica de irrigación localizada que suministra el agua directamente a la zona radicular de las plantas, lo que minimiza las pérdidas por evaporación y escorrentía superficial. Scholten (2024), destaca que este método alcanza eficiencias entre el 80 % y el 95 %, superando significativamente a los sistemas de riego por gravedad o aspersión, además, cuando se integra con mecanismos automatizados, el riego por goteo permite una gestión más precisa y controlada del recurso hídrico.

En los últimos años, el sistema de riego por goteo ha incorporado innovaciones orientadas hacia la automatización y la digitalización agrícola, lo que ha permitido una gestión más inteligente del recurso hídrico, por ende, estas tecnologías integran sensores de humedad del suelo, controladores electrónicos y válvulas automatizadas que regulan el caudal de agua en función de las necesidades del cultivo y de las condiciones climáticas (Márquez et al., 2024).

El sistema de riego por goteo está compuesto por una fuente de agua (tanque, pozo o reservorio), un sistema de bombeo que garantiza el caudal y la presión requeridos, un sistema de filtrado para evitar la obstrucción de los emisores, tuberías principales y laterales que distribuyen el flujo, goteros o emisores encargados de suministrar el agua de manera controlada en la zona radicular del cultivo, y válvulas o reguladores de presión que permiten mantener la uniformidad del riego, por lo tanto, estos compuestos resultan fundamentales para asegurar la eficiencia hídrica

y reducir pérdidas por evaporización, garantizando la distribución homogénea del agua (Scholten, 2024).

6.3 Sostenibilidad hídrica:

Entendida como la capacidad de garantizar la disponibilidad, calidad y gestión responsable del agua para satisfacer las necesidades humanas y ecológicas presentes y futuras, por lo tanto, según Vargas y Valverde (2022), este principio implica adoptar tecnologías que permitan reducir el desperdicio de agua y mejorar su distribución en los sistemas agrícolas, en ese sentido, el desarrollo de un prototipo de riego eficiente basado en energía solar contribuye directamente a la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas.

La hidráulica aplicada al riego se fundamenta en el estudio del comportamiento del agua en movimiento dentro de sistemas de conducción, considerando variables como caudal, presión, velocidad y pérdidas de carga por fricción en tuberías y accesorios. No obstante, en el sistema de riego por goteo, es importante garantizar una presión adecuada y uniforme para asegurar la distribución homogénea del agua en todos los emisores, lo cual depende del correcto dimensionamiento de las tuberías, la altura manométrica total y la selección apropiada del sistema de bombeo, por lo tanto, estos principios se sustentan en ecuaciones fundamentales como la de continuidad y la ecuación de Bernoulli, para un eficiente diseño hidráulico de sistemas agrícolas (Howell, 2001).

6.4 Antecedentes:

Diversas investigaciones han demostrado el potencial de los sistemas de riego alimentados por energía solar en distintos contextos, ya que, a nivel internacional, Bawa et al. (2023), analizaron más de ochenta estudios y concluyeron que los sistemas de bombeo fotovoltaico

reducen entre un 30 % y un 50 % los costos operativos en comparación con los sistemas tradicionales alimentados con combustibles fósiles. De igual forma, Abdelhamid et al., (2025), demostraron que la integración de sensores de humedad en sistemas inteligentes de riego permite reducir en un 28 % tanto el consumo de agua como el de energía, gracias a la automatización de los procesos.

En países como la India, Marruecos y Chile, la combinación de tecnologías solares con riego automatizado ha mostrado impactos positivos en la eficiencia de cultivos y en la adaptación al cambio climático, por ende, Márquez et al., (2024), evidencian que el uso de sensores y aplicaciones móviles permite monitorear en tiempo real las condiciones del suelo, lo cual facilita una distribución equitativa del agua en cultivos de pequeña escala y finalmente estos resultados confirman que la energía solar es una fuente viable y sostenible para sistemas agrícolas descentralizados.

6.5 Bases teóricas:

La teoría de la sostenibilidad, planteada inicialmente por el Informe Brundtland (1987), propone la satisfacción de las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas., según Sachs (1999), amplía este concepto al considerar que el desarrollo sostenible implica equilibrio entre los aspectos sociales, económicos y ambientales, por lo tanto, en el caso del presente proyecto, esta teoría se refleja en el propósito de diseñar un sistema que combine eficiencia técnica con responsabilidad ambiental, garantizando el uso racional del agua y la energía en entornos rurales.

Por otro lado, **la teoría de la eficiencia energética** busca maximizar el rendimiento de los recursos energéticos reduciendo el consumo y las pérdidas, Según Goldemberg (2004), sostiene

que la eficiencia es un componente esencial del desarrollo sostenible, pues permite alcanzar resultados equivalentes con un menor gasto de energía, este principio es aplicable al diseño del prototipo, ya que el uso de energía solar fotovoltaica minimiza los costos y dependencias energéticas, favoreciendo la autonomía de los agricultores.

Finalmente, **el enfoque de innovación tecnológica agrícola** de Rogers (2003), explica cómo las nuevas tecnologías son adoptadas en contextos sociales específicos, considerando factores como la accesibilidad, la compatibilidad y la facilidad de uso y en este sentido, la automatización del riego mediante sensores, controladores y energía fotovoltaica constituye una innovación que transforma las prácticas agrícolas tradicionales, permitiendo un manejo más inteligente del recurso hídrico y energético.

7. Marco Metodológico

7.1 Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto de tipo cuantitativo y de componente experimental, así mismo bajo la técnica cualitativa que se orienta a la validación social y funcional del prototipo, el estudio se sustenta en el enfoque de Investigación Basada en el Diseño (Design Science Research), según Gregor y Hevner (2020) este permite desarrollar, implementar y evaluar soluciones tecnológicas aplicadas a problemas reales, por ende, en este caso, se busca diseñar y poner en funcionamiento un prototipo de riego automatizado alimentado por energía fotovoltaica, que influya en el uso eficiente del recurso hídrico y al aprovechamiento sostenible de fuentes renovables.

Este enfoque incorpora elementos cualitativos orientados a recoger percepciones, observaciones y niveles de aceptación por parte de los posibles usuarios, a fin de fortalecer la aplicabilidad social de la propuesta.

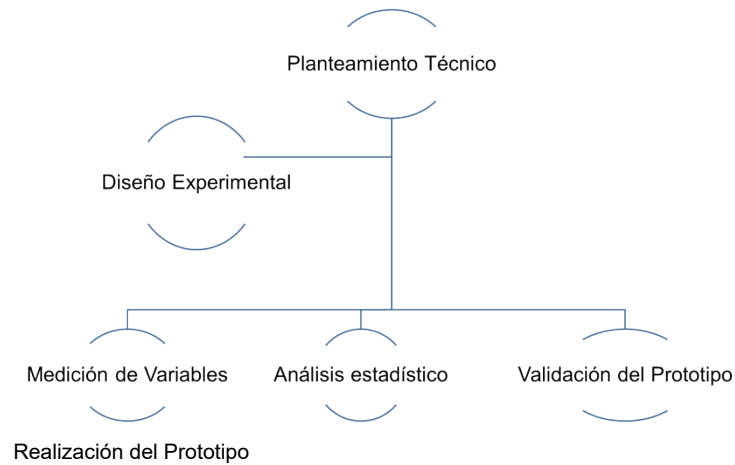
7.2 Diseño Metodológico

El proceso metodológico se desarrollará en diversas etapas que incluyen el diagnóstico inicial del contexto, el diseño y dimensionamiento del sistema, la construcción del prototipo y su evaluación experimental en condiciones reales es importante resaltar que las pruebas de campo permitirán medir variables como el volumen de agua utilizado, la humedad del suelo, el caudal y

el consumo energético, estableciendo relaciones causa y efecto que sustenten la eficiencia del sistema (Hernández, 2022).

Diagrama 1.

Proceso Cuantitativo

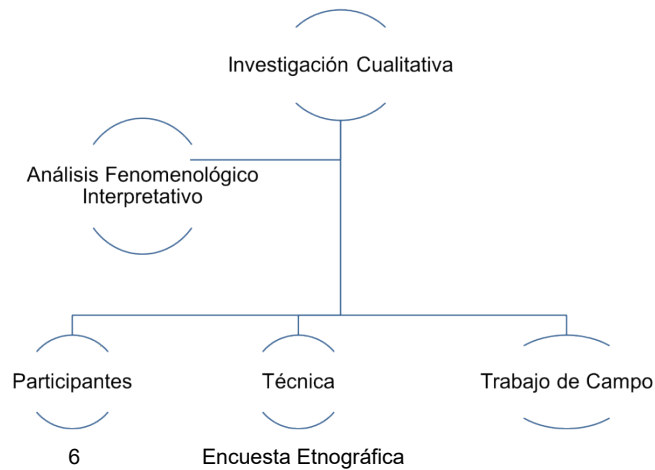


Nota: Elaboración propia. 2026.

Además, se tendrá en cuenta una fase cualitativa de validación social mediante encuestas etnográficas a posibles participantes, con el fin de valorar la aceptación, facilidad de uso y aplicabilidad del sistema (Martínez y Quintero, 2021).

Diagrama 2.

Proceso Cualitativo



Nota: Elaboración propia. 2026.

7.3 Materiales y técnica

Para la elaboración del prototipo de riego alimentado por energía fotovoltaica se emplearon componentes reales a escala reducida que permiten simular el funcionamiento de un sistema de riego en condiciones controladas, cómo lo son:

- Panel solar de baja potencia (entre 6V y 12V)
- Bomba de agua sumergible de bajo voltaje
- Manguera principal de distribución
- Microtubos para derivaciones de riego
- 10 goteros (puntos de emisión)
- Conectores tipo T y acoples
- Tanque de almacenamiento de agua (capacidad entre 5 y 10 litros)
- Filtro básico para agua
- Válvula de control de flujo

- Mangueras de silicona para conexión de la bomba
- Cables conductores para conexión eléctrica
- Interruptor manual para control de encendido/apagado
- Base de soporte para el montaje del prototipo (superficie de 2 m × 1 m)
- Sustrato y plantas para la simulación del cultivo

7.4 Población y muestra

La población objeto del estudio corresponde a las condiciones técnicas del área de prueba y, en el componente social, a los agricultores potenciales del sistema, es importante tener en cuenta que la muestra experimental estará representada por el área donde se implementará el prototipo, mientras que la muestra cualitativa estará compuesta por un grupo intencional de 6 participantes seleccionados del departamento del Atlántico.

7.5 Procedimiento

El armado de la maqueta se realizará siguiendo un procedimiento secuencial que permite integrar cada uno de los componentes estructurales, hidráulicos y fotovoltaicos.

En primer lugar, se adecuó el área de implementación del prototipo sobre una superficie de 2m x 1m, donde se definió la disposición del cultivo en hileras, manteniendo una separación de 20 a 25 cm entre plantas y entre líneas, con el fin de simular condiciones reales de siembra en pequeña escala.

En segundo lugar, se instaló el sistema de almacenamiento de agua, ubicando un tanque con capacidad entre 5 y 10 litros, dentro del cual se incorporó la bomba sumergible, a partir de este punto, se realizó la conexión de la manguera principal de distribución, desde la cual se

derivaron microtubos hacia los puntos de emisión. Seguido a esto, se conectaron 10 goteros distribuidos de manera uniforme en el área de cultivo, garantizando el suministro localizado de agua a cada planta.

Finalmente, se verificó la correcta operación del sistema mediante pruebas iniciales de funcionamiento, evaluando la distribución del agua, la estabilidad del flujo en los goteros y la respuesta del sistema ante la activación del panel solar.

7.6 Análisis de datos

El análisis de datos se realizó a partir de las mediciones obtenidas durante las pruebas de funcionamiento de la maqueta, con el fin de evaluar el desempeño del prototipo de riego alimentado por energía fotovoltaica, con ello, se registraron las variables como el Caudal de agua suministrado por los goteros, el volumen total de agua consumida en función del tiempo de riego, el voltaje y la corriente generados por el sistema fotovoltaico, así como el tiempo requerido para la humectación del área de cultivo, adicionalmente, se analizaron la relación entre el agua suministrada y posibles pérdidas durante el proceso, con el fin de estimar la eficiencia del sistema.

Los datos se organizarán en tablas y posteriormente se calcularán promedios, porcentajes y comparaciones entre las distintas pruebas realizadas (5, 10 y 15 minutos de riego). Por otra parte, desde la parte cualitativa, se aplicó una encuesta de carácter etnográfico dirigida a actores de la comunidad agrícola, con el propósito de identificar prácticas, percepciones y necesidades relacionadas con el uso del agua y la implementación de sistemas de riego en pequeña escala, por lo tanto, la información recolectada fue analizada mediante la identificación de categorías y patrones de respuesta que permitan comprender el contexto social y productivo en el cual se propone el prototipo.

7.7 Consideraciones éticas y ambientales

El desarrollo del prototipo se realizará cumpliendo las normas de seguridad eléctrica, ambiental y de manejo responsable de recursos hídricos, con ello, la participación de personas en encuestas se regirá por principios éticos de consentimiento informado, confidencialidad y respeto a la dignidad de los participantes. Asimismo, cualquier actividad de recolección de información se realizará respetando la normativa institucional y nacional vigente, asegurando que los datos obtenidos se manejen con transparencia y responsabilidad.

8. Resultados

Con base a los resultados del primer objetivo específico, *Determinar los requerimientos hídricos y energéticos del cultivo seleccionado mediante la estimación del caudal necesario, el consumo de agua y la demanda eléctrica del sistema de bombeo:*

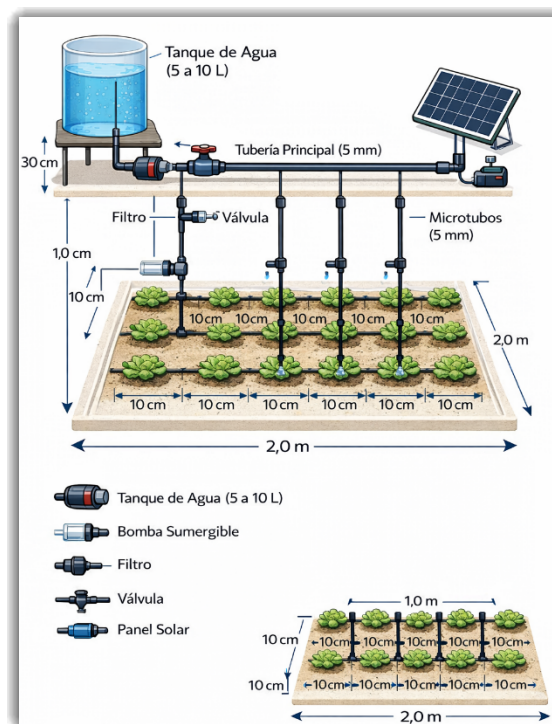
Se presenta el prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica, no obstante, el sistema está compuesto por un tanque de almacenamiento de agua con capacidad entre 5 y 10 litros, una bomba sumergible de baja potencia, una tubería principal de distribución, microtubos con goteros individuales, un sistema de filtrado y una válvula de control de flujo, por lo tanto, la energía requerida para su funcionamiento es suministrada por un panel solar, el cual permite la operación autónoma del sistema.

A partir de ello, el área de implementación del prototipo corresponde a una superficie aproximada de 2m x 1m, en la cual se ha dispuesto una distribución de plantas organizada en hileras, con espaciamientos de 20 a 25 cm entre plantas y líneas de cultivo, permitiendo simular condiciones de siembra en pequeña escala.

El prototipo desarrollado integra de manera funcional los componentes hidráulicos y energéticos necesarios para la operación de un sistema de riego por goteo a pequeña escala, permitiendo establecer una relación directa entre el caudal suministrado, el consumo de agua y la demanda energética del sistema, en este sentido, la configuración constituye la base para la evaluación experimental de los requerimientos hídricos y energéticos del cultivo, facilitando el análisis del desempeño del sistema en términos de eficiencia y sostenibilidad bajo condiciones controladas.

Figura 1.

Prototipo de riego por goteo



Nota: Elaboración con IA en base al sistema de riego por goteo con energía fotovoltaica

Figura 2.

Distribución del sistema de riego por goteo en el área experimental



Nota: Elaboración con IA a partir del diseño del sistema de riego por goteo

El sistema de riego fue diseñado para operar mediante una tubería principal con derivaciones hacia microtubos, los cuales finalizan en goteros individuales que suministran agua directamente a cada planta, este se estableció en un total de 10 puntos de emisión (goteros), distribuidos de manera uniforme dentro del área de cultivo, por consiguiente, cada gotero presenta un caudal estimado entre 1 y 1.2 L/h, lo que permite garantizar una distribución controlada del agua.

Caudal total estimado del sistema:

$$\text{Caudal total} = 10 \text{ goteros} \times 1.2 \text{ L/h}$$

$$\text{Caudal total} \approx 12 \text{ L/h}$$

Esta configuración permite ajustar el sistema a una escala experimental, optimizando el uso del recurso hídrico, esto se desarrolla gracias a que cuenta con un panel solar encargado de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba sumergible, puesto que, el número de goteros es reducido (10 unidades), la demanda hidráulica del sistema es menor, lo que implica un menor requerimiento energético, favoreciendo la eficiencia del sistema fotovoltaico.

Para la evaluación del sistema, se establecieron los siguientes parámetros:

- Consumo de agua (L)
- Tiempo de riego (min)
- Caudal por gotero (L/h)
- Número de goteros (10)
- Voltaje del sistema (V)
- Corriente eléctrica (A)
- Consumo energético (Wh)

Tabla 4.

Evaluación del tratamiento del sistema de riego por goteo

Tratamiento	Tiempo de riego
T1	5 minutos
T2	10 minutos
T3	15 minutos

Nota: Cada tratamiento será replicado en condiciones controladas para garantizar la confiabilidad de los resultados

Con base en el caudal estimado del sistema (12 L/h), se proyecta el siguiente consumo de agua:

Tabla 5.

Proyección inicial del consumo del sistema de riego por goteo

Tiempo de riego (min)	Consumo estimado (L)
------------------------------	-----------------------------

5	1.0
10	2.0
15	3.0

Nota: Se proyecta que el consumo de agua será proporcional al tiempo de riego, lo que permitirá regular de manera eficiente el suministro hídrico según las necesidades del cultivo

El consumo estimado se calculó a partir del caudal total del sistema (12 L/h), determinado por la suma del caudal de los 10 goteros, asumiendo un comportamiento lineal del flujo en función del tiempo de riego.

Considerando una bomba de baja potencia (aproximadamente 6V y 1A), se proyecta el siguiente consumo energético:

Tabla 6.

Proyección del consumo energético del sistema de riego por goteo

Tiempo de riego (min)	Consumo energético (Wh)
5	0.5 Wh
10	1.0 Wh
15	1.5 Wh

Nota: el sistema se mantendrá bajo consumo energético debido a la baja demanda hidráulica generada por los 10 goteros

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que el sistema presenta un comportamiento proporcional entre el tiempo de riego y el consumo de agua, lo cual permite un control eficiente del recurso hídrico mediante la regulación del tiempo de operación, de este

modo, el caudal estimado de 12 L/h, distribuido en 10 goteros, garantiza una aplicación uniforme del agua en el área de cultivo, favoreciendo la eficiencia del riego localizado.

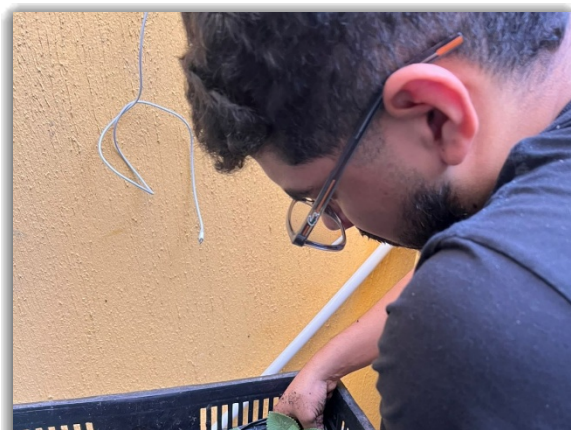
En términos energéticos, se proyecta un consumo bajo y estable del sistema, asociado a la utilización de una bomba de baja potencia alimentada por energía fotovoltaica, por lo tanto, esta característica resulta favorable para su implementación en zonas con acceso limitado a energía eléctrica convencional, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema, asimismo, los valores obtenidos permiten establecer criterios iniciales de operación del sistema de riego por goteo.

Con base en el segundo objetivo específico *“seleccionar los componentes técnicos necesarios para implementar el diseño del sistema de riego de agua alimentado por energía fotovoltaica en el departamento del Atlántico”*. La selección de los componentes técnicos del sistema de riego por goteo alimentado con energía fotovoltaica se desarrolló con base en los requerimientos hidráulicos y energéticos previamente escogidos, con ello, se tuvo en cuenta diversos criterios de eficiencia, bajo costo, facilidad de implementación y sobre todo adaptabilidad a pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

El sistema se construyó mediante un prototipo, en el cual se integraron los componentes hidráulicos, estructurales y energéticos necesarios para su funcionamiento:

Figura 3.

Prototipo experimental del sistema de riego por goteo



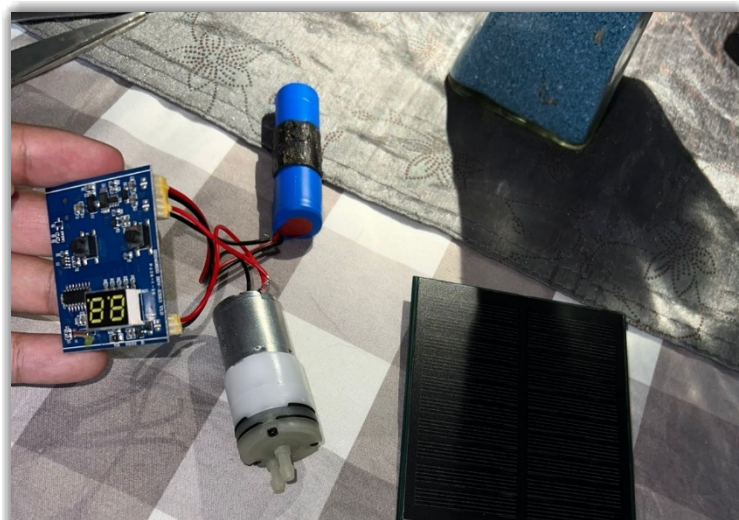
Nota: Fotografía propia. 2026

El sistema energético se construyó con un panel solar fotovoltaico de baja potencia (6V-12V), este se encarga de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba de agua, en este sentido, fue seleccionado debido a la baja demanda energética del sistema, permitiendo una operación autónoma sin dependencia de la red eléctrica convencional.

La elección del sistema fotovoltaico resulta pertinente para el departamento del Atlántico, debido a sus altos niveles de radiación solar, lo que garantiza una disponibilidad energética constante durante el día. La instalación del panel solar y su conexión al sistema se evidencia en:

Figura 4.

Sistema de riego por goteo mediante panel solar

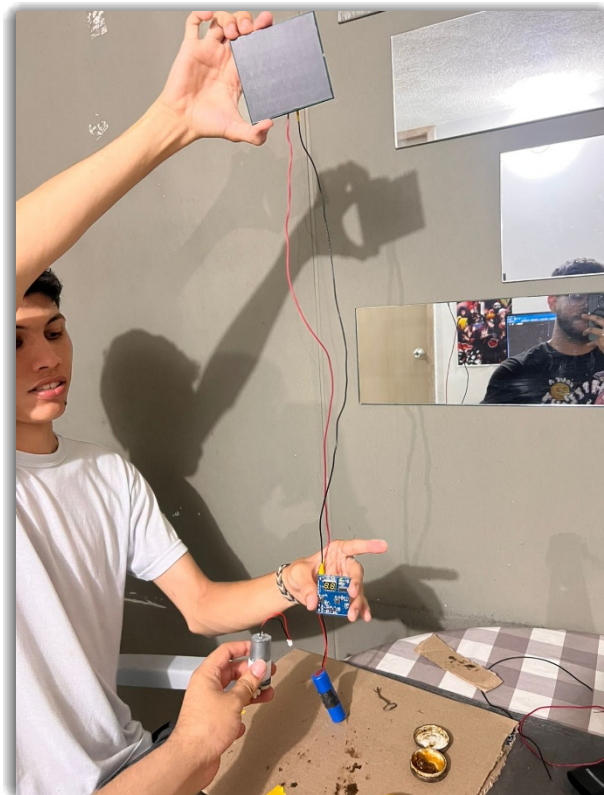


Nota: Fotografía propia. 2026

El sistema de bombeo está conformado por una bomba sumergible de bajo voltaje (6V - 1A), seleccionada en función del caudal requerido del sistema, este se estima en aproximadamente 12 L/h. Esta bomba permite impulsar el agua desde el tanque de almacenamiento hacia la red de distribución, garantizando un flujo continuo y estable, por lo tanto, su bajo consumo energético la hace compatible con el sistema fotovoltaico, favoreciendo la eficiencia energética del sistema.

Figura 5.

Sistema de bombeo del prototipo de riego por goteo



Nota: Fotografía propia. 2026

Por otra parte, el sistema de distribución hidráulica está conformado por una manguera principal, microtubos de derivación, conectores tipo T y con ello mangueras de silicona, los cuales permiten transportar el agua desde la bomba hacia cada punto de emisión.

Este diseño ayuda a garantizar una distribución uniforme del flujo, minimizando pérdidas de agua y asegura un suministro eficiente hacia cada planta.

Figura 6.

Sistema de distribución hidráulica del sistema de riego por goteo



Nota: Fotografía propia. 2026

El sistema de emisión está construido por 10 goteros distribuidos uniformemente en el área de cultivo, cada uno con un caudal estimado entre 1 y 1.2 L/h, es importante resaltar, que este tipo de riego permite aplicar el agua directamente en la zona radicular de las plantas, reduciendo pérdidas por evaporación y aumentando la eficiencia hídrica. Por consiguiente, para la validación del sistema, se utilizó el cultivo de orégano, el cual fue sembrado con abono en una canasta que permitió simular condiciones de cultivo a pequeña escala, dejando ver cómo este proceso se puede dar en pequeñas zonas agrícolas, por ende, la distribución de las plantas permitió evaluar la uniformidad del riego y el comportamiento del sistema.

Figura 7.

Implementación del cultivo experimental



Nota: Fotografía propia. 2026

La selección de los componentes del sistema de riego por goteo desarrollado con energía fotovoltaica permitió la construcción de un sistema funcional, enfocado en la integración de elementos hidráulicos y energéticos adecuados para condiciones de pequeña escala. Cada componente fue elegido en función de los requerimientos previamente determinados, lo que

garantizó una coherencia entre el diseño teórico y la implementación práctica del prototipo, en este sentido, la construcción y relación entre el sistema fotovoltaico, la bomba de baja potencia, la red de distribución y los dispositivos de emisión permitieron establecer un modelo operativo eficiente y técnicamente viable.

Asimismo, el prototipo demuestra ventajas significativas desde la perspectiva de la sostenibilidad y la eficiencia operativa, ya que como se ha observado la energía solar reduce la dependencia de fuentes convencionales y con ello, se ahorran los costos asociados al consumo energético, por tanto, la distribución controlada permite optimizar recursos hídricos y minimizar pérdidas por evaporación, sobre todo en contextos de pequeña agricultura.

Figura 8.

Sistema de riego por goteo finalizado



Nota: Fotografía propia. 2026

Desde el punto de vista hidráulico, el sistema demostró una adecuada capacidad para suministrar agua de manera uniforme a través de los goteros, ayudando a mantener el caudal controlado y proporcional al tiempo de riego, asimismo, el uso de un tanque de almacenamiento de 5 litros resultó suficiente para cubrir las necesidades experimentales sin generar interrupciones en la operación, lo que ayudó a observar un proceso adecuado entre la capacidad de almacenamiento y el consumo proyectado, la idea principal se enfocó tanto en el reciclaje del prototipo como en la sostenibilidad del mismo.

Este prototipo experimental ha permitido reducir la dependencia de fuentes convencionales de energía, ya que con la estabilidad en la operación de la bomba y el bajo consumo energético observado consolidan la pertinencia de este tipo de soluciones en contextos rurales con acceso limitado a infraestructura eléctrica, en conjunto, el proceso resulta viable, adaptable y de bajo costo para su aplicación en pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Finalmente, desde el tercer objetivo específico *“Evaluar el desempeño del prototipo mediante la medición del ahorro de agua, el consumo energético y la viabilidad operativa en condiciones experimentales”*

Se pudo lograr a partir de un análisis de encuestas etnográficas 4 categorías principales y 15 categorías emergentes.

Tabla 7.

Categorías principales y emergentes del análisis de las encuestas etnográficas

Categorías Principales	Categorías Emergentes
Prácticas y limitaciones del riego tradicional	➤ Riego manual ➤ Riego sin control técnico ➤ Sistemas precarios (gravedad) ➤ Falta de tecnificación

Ineficiencia y dificultades operativas	➤ Desperdicio de agua ➤ Falta de medición ➤ Mantenimiento constante ➤ Condiciones climáticas adversas
Impacto en tiempo, esfuerzo y costos	➤ Esfuerzo físico ➤ Alta demanda de tiempo ➤ Costos en combustible ➤ Afectación económica
Percepción y aceptación de soluciones tecnológicas	➤ Ahorro económico esperado ➤ Automatización del riego ➤ Utilidad del prototipo

Nota: elaboración propia. 2026.

Prácticas y limitaciones del riego tradicional:

Esta categoría evoca cómo los agricultores en la actualidad siguen implementando métodos tradicionales que se caracterizan principalmente por la baja tecnificación, lo cual condiciona de cierto modo la eficiencia del proceso productivo y llega a limitar los controles sobre los recursos hídricos que se utilizan en estos procesos.

Riego manual:

Se logra identificar una práctica enfocada en esfuerzo físico y desde la falta de medición tecnológica, lo que evoca agricultores que se esfuerzan mucho más por falta de recursos sostenibles que minimicen el trabajo de estas pequeñas unidades agrícolas: Así lo deja ver W.G:

“Aquí lo que hacemos es regar con un balde y un chocorito, uno va caminando el terreno y le va echando agua a las matas” (Participante W.G, encuesta etnográfica, 2026).

Riego sin control técnico:

Desde esta perspectiva, el riego se logra realizar de forma empírica, sin mediciones ni mucho menos criterios técnicos que lo respalden, estructuralmente se evidencia una gestión intuitiva sobre el recurso hídrico. Así lo expresa S.N:

“Nosotros regamos a manguera uno le da vuelta al terreno con la manguera y echa agua a ojo” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Sistemas precarios (gravedad):

Algunos agricultores han tomado la decisión de implementar diferentes soluciones básicas para el sistema de gravedad y es que si bien, aunque estos presentan diversas limitaciones operativas importantes, estas personas buscan soluciones que a corto plazo les ayude. Así lo deja ver E.R:

“Bueno, en sí eléctrico no es, eso funciona más que todo por gravedad, porque el agua baja del tanque” (Participante E.R, encuesta etnográfica, 2026).

Falta de tecnificación:

Se observa una ausencia generalizada de tecnologías agrícolas, lo que conlleva a observar ciertas condiciones estructurales poco modernas, ya que a pesar de las diferentes tecnologías que se implementan en la actualidad, los agricultores de pequeñas escalas se han quedado en procesos manuales que implican más trabajo. Así lo expresa W.G:

“No tenemos nada tecnificado ni por canales ni nada de eso, todo es más bien así como lo que uno dice manual” (Participante W.G, encuesta etnográfica, 2026).

Ineficiencia y dificultades operativas:

Esta Categoría relaciona las diferentes problemáticas derivadas de las prácticas tradicionales, lo que evidencia pérdidas desde los recursos, fallas técnicas y hasta condiciones ambientales que afectan directamente el rendimiento del riego que se desarrolla en pequeñas escalas agrícolas.

Desperdicio de agua:

El uso ineficiente del agua es recurrente, ya que se observa una falta de control en la aplicación de esta. Así lo deja ver

“Uno se gasta mucha agua porque a veces uno echa de más en un lado y en otro queda seco” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Falta de medición:

Los agricultores no cuentan con herramientas suficientes que les permitan cuantificar el volumen de agua utilizado. Así lo deja ver S.N:

“Uno no sabe bien cuánta agua le está echando a la mata” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Mantenimiento constante:

Los sistemas rudimentarios requieren de intervención frecuente frente a los desafíos del día a día, lo que incrementa la carga operativa de estos agricultores. Así lo expresa E.R:

“Los goteritos también se tapan mucho, eso hay que estarles metiendo mano casi toda la semana” (Participante E.R, encuesta etnográfica, 2026).

Condiciones climáticas adversas:

Desde la perspectiva de factores como el calor intenso, este llega a afectar la disponibilidad y la eficiencia del agua. Así lo deja ver E.R:

“Cuando hace ese sol, ni le cuento, porque el agua escasea” (Participante E.R, encuesta etnográfica, 2026).

Impacto en tiempo, esfuerzo y costos:

Esta categoría destaca cómo las limitaciones técnicas se relacionan directamente con una alta carga física, de consumo de tiempo y presión económica para los agricultores, evocando un proceso que afecta en distintos aspectos y que sigue vigente después de años de trabajar en ello.

Esfuerzo físico:

El riego en pequeñas escalas agrícolas implica actividades exigentes que afectan el bienestar de los agricultores. Así lo destaca

“Eso cansa bastante, porque toca estar ahí dándole con la manguera bajo el sol” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Alta demanda de tiempo:

El proceso de riego si bien requiere de una dedicación significativa que limita otras actividades productivas dentro del proceso agrícola. Así lo deja ver S.N:

“Eso se lleva su buen rato por ahí unas dos o tres horas cada vez que uno riega” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Costos en combustible:

El uso de otras tecnologías como la gasolina, implica gastos constantes en los agricultores puesto que, es el método que implementan para el proceso de su riego. Así lo deja ver S.N:

“El galón de diésel está por los \$11.000 y a veces gastamos tres galones en una tarde”
(Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Afectación económica:

Si bien los costos asociados al riego manual se van incrementando de forma progresiva en estos cultivos de pequeña escala, por ende, se observa un impacto en la economía de los agricultores. Así lo expresa

“al fin y al cabo, si sacamos cuenta se gasta bastante y eso se va sumando en la semana”
(Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Percepción y aceptación de soluciones tecnológicas:

Finalmente, esta categoría evidencia una actitud favorable hacia la incorporación de tecnologías, especialmente aquellas basadas en energía solar, en este sentido se destaca el potencial que tienen para mejorar las condiciones productivas.

Ahorro económico esperado:

Se percibe la tecnología como una opción para reducir gastos operativos, que de una u otra forma son notables y afectan la economía de los trabajadores. Así lo expresa S.N:

“Uno se ahorra esa plata y también no depende de que se vaya la luz o de estar comprando ACPM” (Participante S.N, encuesta etnográfica, 2026).

Automatización del riego:

La posibilidad de automatizar el riego es altamente valorada por la reducción de trabajo que implica. Así lo deja ver E.R:

“Si ese sistema que usted me mostró riega solo y con sensor, eso le quita a uno ese trabajo y si además funciona con el sol, mejor todavía, porque uno no gasta en luz ni en gasolina, la verdad, eso sería una ayuda grande pa’ uno acá en el campo” (Participante E.R, encuesta etnográfica, 2026).

Utilidad del prototipo:

Existe una clara aceptación del sistema propuesto como solución a las problemáticas actuales. Así lo deja ver W.G:

“Yo digo que sí serviría bastante, porque vea, uno aquí riega con balde y eso es duro, toca estar cargando agua todo el tiempo como yo le dije, si ese sistema riega solo, eso le quita a uno ese trabajo tan pesado” (Participante W.G, encuesta etnográfica, 2026).

Por medio de las encuestas etnográficas y lo que se logró analizar del prototipo se destacan los siguientes cálculos:

1-Base de Cálculo (Desde Los Discursos)

Frecuencia:

3 veces por semana

Tiempo por riego:

2-3 horas por jornada

Sin control de agua:

“agua a ojo” - alta variabilidad

2. Supuesto Técnico (necesario y válido)

Como no hay medición directa, usamos referencia técnica básica:

Riego manual típico $\approx$ 20-40 L por hora (baja eficiencia)

Entonces:

Consumo por jornada

Mínimo: $2 \text{ h} \times 20 \text{ L} = 40 \text{ L}$

Máximo: $3 \text{ h} \times 40 \text{ L} = 120 \text{ L}$

Promedio razonable: 60-100 L por jornada

3. Consumo Semanal

Frecuencia: 3 veces por semana

Mínimo:

$$30 \times 3 = 90 \text{ L}$$

Máximo:

$$60 \times 3 = 180 \text{ L}$$

Resultado semanal: 90 – 180 L

4. Consumo Mensual

Mínimo:

$$90 \times 4 = 360 \text{ L}$$

Máximo:

$$180 \times 4 = 720 \text{ L}$$

5. Consumo con Prototipo (Goteo Automatizado)

Goteo automatizado $\approx$ **10–20 L por jornada**

Frecuencia: 2–3 veces por semana

Cálculo

Semanal:

$$10 \times 2 = 20 \text{ L}$$

$$20 \times 3 = 60 \text{ L}$$

20 – 60 L/semana

Mensual:

$$20 \times 4 = 80 \text{ L}$$

$$60 \times 4 = 240 \text{ L}$$

Resultado:

$$80 - 240 \text{ L/mes}$$

6. Ahorro De Agua

Calculamos con extremos para que sea sólido:

Caso mínimo ahorro

$$\frac{400 - 160}{400} = 60\%$$

Caso máximo ahorro

$$\frac{700 - 80}{700} \approx 88.5\%$$

7. Consumo De Combustible

- 3 galones por jornada
- 3 veces por semana

Semanal:

$$3 \times 3 = \mathbf{9 \text{ galones}}$$

Mensual:

$$9 \times 4 = \mathbf{36 \text{ galones}}$$

Tabla 8.*Análisis del desempeño del prototipo*

Indicador	Situación ACTUAL (sin prototipo)	Situación ESTIMADA (con prototipo)
Volumen de agua por riego	Alto y variable (sin control, riego “a ojo”)	Bajo y controlado ($\approx 1\text{-}3$ L por riego según tiempo)
Frecuencia de riego semanal	Variable (3 veces por semana hasta casi diario)	Automatizado según humedad (2–3 veces optimizado)
Consumo semanal de agua	Alto ($\approx 90\text{-}180$ L o más, con pérdidas)	Bajo ($\approx 20\text{-}40$ L, uso eficiente)
Consumo mensual de agua	Muy alto ($\approx 400\text{--}700$ L)	Reducido ($\approx 80\text{-}160$ L)
Ahorro mensual de agua	No aplica	60% – 85% de ahorro hídrico

Fuente de energía actual	Manual / diésel / gasolina / gravedad	Energía solar fotovoltaica
Consumo de combustible	Alto (hasta 3 galones por jornada en algunos casos)	No aplica
Costo energético semanal	Alto (compra de combustible $\approx$ \$40.000 – \$120.000)	No aplica

Nota: elaboración propia. 2026.

9. Discusión

En primer lugar, los resultados obtenidos en este proyecto de investigación permiten confirmar la existencia de una problemática, fundamentalmente en las prácticas de riego utilizadas por los agricultores de pequeña escala en el departamento del Atlántico, caracterizada por la baja tecnificación y la alta dependencia de métodos manuales o rudimentarios. Esta situación coincide con lo planteado en el marco teórico, donde se señala que más del 60 % de las unidades productivas continúan operando bajo esquemas tradicionales, lo que limita la eficiencia en el uso del recurso hídrico (Gobernación del Atlántico, 2024).

En relación con la eficiencia hídrica, los resultados evidencian que el consumo de agua en sistemas tradicionales presenta altos niveles de variabilidad y desperdicio, lo cual se relaciona arduamente con lo reportado por Howell (2001), autor que establece que los sistemas convencionales pueden presentar eficiencias entre el 40 % y 70 %, posteriormente, el prototipo desarrollado demuestra una reducción significativa en el consumo de agua, estimada entre un 60%

y un 85%, lo que, realmente evoca un proceso inferior al rango óptimo teórico del riego por goteo (80% - 95%), resulta altamente relevante considerando que se trata de un sistema experimental de bajo costo y adaptado a condiciones locales, esto sugiere que, incluso en configuraciones básicas, la tecnología de goteo automatizado puede generar mejoras sustanciales en la gestión hídrica.

Por otra parte, los resultados también permiten observar que la ineficiencia en el uso del agua no es únicamente un problema técnico, sino que está relacionada a factores operativos y contextuales, como la falta de medición, el mantenimiento constante y las condiciones climáticas adversas, no obstante, el calor extremo y la alta evapotranspiración del departamento del Atlántico intensifican las pérdidas de agua, tal como se describe en la literatura sobre sostenibilidad hídrica en regiones tropicales. Esto refuerza la importancia de implementar sistemas que permitan una aplicación localizada del recurso, como el riego por goteo, el cual reduce significativamente las pérdidas por evaporación (Scholten, 2024).

En términos energéticos, los resultados demuestran que el uso de combustibles fósiles como el diésel representa una afectación económica que, si bien cargan los agricultores, esta situación coincide con lo planteado por Bawa et al., (2023), quienes evidencian que los sistemas tradicionales presentan altos costos operativos asociados al uso de combustibles. En este contexto, la incorporación de energía solar fotovoltaica en el prototipo no solo elimina estos costos, sino que también evoca un modelo de autonomía energética que resulta especialmente pertinente para zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica.

Desde una perspectiva social, los resultados cualitativos evidencian una alta aceptación del prototipo por parte de los agricultores, quienes valoran especialmente la automatización del sistema y la reducción del esfuerzo físico asociado al riego, por lo tanto, este aspecto se relaciona directamente con la teoría de difusión de innovaciones de Rogers (2003), la cual tiene en cuenta

que la adopción de nuevas tecnologías depende de factores como la utilidad percibida y la facilidad de uso y viéndola desde el punto de vista de los agricultores, el sistema propuesto cumple con ambos criterios, lo que incrementa significativamente su potencial de adopción en el contexto local.

Finalmente, en términos generales, los resultados de este proyecto de investigación confirman que la combinación de riego por goteo automatizado y energía solar fotovoltaica constituye una solución técnica, ambiental y socialmente viable para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

10. Limitaciones del estudio

Una de las principales limitaciones del estudio corresponde a la escala experimental del prototipo, el cual fue evaluado en condiciones controladas y en un área reducida, lo que implica que los resultados no incorporan todas las variables presentes en escenarios reales de campo, como variaciones climáticas, tipos de suelo o diversidad de cultivos, sin embargo, esta condición permitió validar de manera precisa el funcionamiento técnico del sistema y establecer una base confiable para su futura implementación a mayor escala.

Por otra parte, algunos valores relacionados con el consumo de agua y energía fueron estimados a partir de datos experimentales y percepciones de los participantes, debido a la ausencia de mediciones prolongadas en condiciones reales, no obstante, estos resultados se encuentran metodológicamente sustentados y fueron complementados con un análisis cualitativo que evidenció la aceptación del sistema, fortaleciendo así la validez y pertinencia del estudio.

11. Conclusión

El presente proyecto de investigación permitió diseñar y evaluar un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica, enfocado en pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico, cumpliendo satisfactoriamente con el objetivo general planteado, por lo tanto, desde la integración de componentes hidráulicos y energéticos de bajo costo, se logró construir un sistema funcional que responde a las condiciones técnicas, climáticas y socioeconómicas del contexto rural, demostrando que es posible desarrollar soluciones tecnológicas accesibles y sostenibles para el sector agrícola de pequeña escala.

En relación con el primer objetivo específico, se determinaron los requerimientos hídricos y energéticos del sistema, evidenciando que el prototipo presenta un consumo de agua controlado y proporcional al tiempo de riego, Estos resultados se relacionan arduamente con lo planteado en la literatura, donde se destaca que el riego por goteo permite una aplicación localizada del agua, reduciendo pérdidas por evaporación y mejorando la eficiencia del sistema (Scholten, 2024).

Respecto al segundo objetivo, la selección de componentes técnicos permitió integrar de manera eficiente un sistema funcional, de bajo costo y adaptable a condiciones rurales, por ende, este hallazgo resulta importante, ya que coincide con lo expuesto por Rodríguez y Ramírez (2020), quienes señalan que una de las principales barreras para la adopción de tecnologías agrícolas en Colombia es el alto costo de implementación, lo que resalta la importancia de desarrollar soluciones accesibles para pequeños productores.

En cuanto al tercer objetivo, la evaluación del desempeño del prototipo evidenció mejoras significativas en la eficiencia hídrica, estimándose un ahorro de agua entre el 60 % y el 85 % frente a sistemas tradicionales, estos resultados confirman el potencial del riego por goteo como tecnología eficiente para la gestión del recurso hídrico, en este sentido, el sistema resulta eficiente para el ahorro en aspectos tanto de esfuerzo físico como económico (Howell, 2001; Scholten, 2024).

Desde el componente cualitativo, se identificó que los agricultores presentan una alta dependencia de métodos tradicionales, caracterizados por el esfuerzo físico, el consumo excesivo de agua y la falta de control técnico, lo que coincide con lo señalado en estudios sobre ineficiencia hídrica en contextos rurales (Sierra, 2021). Con ello también se evidenció una percepción positiva hacia la implementación de tecnologías sostenibles, especialmente aquellas que reducen costos y automatizan procesos, lo que sugiere una alta disposición a la adopción tecnológica en el contexto local.

En términos ambientales, el prototipo contribuye al uso eficiente del recurso hídrico y a la reducción de la dependencia de energías convencionales, alineándose con los principios de sostenibilidad y con los lineamientos establecidos en políticas nacionales e internacionales orientadas al uso racional del agua y la promoción de energías limpias, por lo tanto, el sistema

propuesto no solo representa una solución técnica, sino también una estrategia de adaptación frente al cambio climático.

En conclusión, el desarrollo de este prototipo demuestra que la integración de riego por goteo automatizado y energía solar fotovoltaica constituye una solución técnica viable, ambientalmente sostenible y socialmente aceptada para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico, en este sentido, este tipo de tecnologías representa una alternativa concreta para mejorar la eficiencia en el uso del agua, reducir costos operativos y promover una agricultura más resiliente frente a los desafíos del cambio climático.

Referencias

- Abdelhamid, M. A., Abdelkader, T. K., Sayed, H. A., Zhang, Z., Zhao, X., & Atia, M. F. (2025). Design and evaluation of a solar powered smart irrigation system for sustainable urban agriculture. *Scientific Reports*, 15(1), 11761.
<https://www.nature.com/articles/s41598-025-94251-3>
- Álvarez, E, Suazo, A. 2019. Diseño de un sistema de riego por goteo automatizado, alimentado con energía fotovoltaica para la finca San Antonio ubicada en la Isla de Ometepe del departamento de Rivas. Recinto Universitario Rubén Darío. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Departamento de Tecnología. <https://core.ac.uk/download/pdf/222782259.pdf>
- Bawa, A. R., Sunnu, A. K., & Sarsah, E. A. (2023). Recent advances in solar-powered photovoltaic pumping systems for drip irrigation. *iRASD Journal of Energy & Environment*, 4(2), <https://journals.internationalrasd.org/index.php/jee/article/view/1968112-132>.

- Capcha-Ochoa, J. M. A.; Chahua-Benito, J. A.; Serafin-Cayllahua, M. A.; Mamani-Martinez, S. E.; Mendivil-Imbertis, J. G.; Mendoza-Fernandez, J. I.; Castro-Vargas, C. (2025). *Smart Irrigation System with IoT, Machine Learning, and Solar Power for Efficient Plant Care. Emerging Science Journal*, 9(3), 1346–1371. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-012>
- Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD). (1987). *Nuestro futuro común* (Informe Brundtland). Naciones Unidas.
- Gobernación del Atlántico. (2024). *Plan de Desarrollo Departamental 2024–2027*.
- Goldemberg, J. (2004). *The promise of clean energy. Energy Policy*, 32(10), 1139–1146.
- Gregor, S., & Hevner, A. R. (2020). *The anatomy of design science research. Journal of the Association for Information Systems*, 21(6), 1622–1650. <https://doi.org/10.17705/1jais.00672>
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza Torres, C. P., & Fernández Collado, C. (2022). *Metodología de la investigación* (7.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281–289. <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2001.932281x>
- IRADUKUNDA, E. (2021). Design of cost effective solar powered auto-irrigation system for Rwanda's farmers (Doctoral dissertation, University of Rwanda (College of science and Technology) <https://dr.ur.ac.rw/handle/123456789/1837>

- Mahindawansa, A., Külls, C., Kraft, P., & Breuer, L. Investigating unproductive water losses from irrigated agricultural crops in the humid tropics through analyses of stable isotopes of water. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24, 2020.
- Martínez, D., & Quintero, P. (2021). Métodos cualitativos para la evaluación de tecnologías sociales. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 12(2), 345–362.
- Martínez, R. Viabilidad económica del riesgo por aspersión semiestacionario a pequeña escala utilizando energía fotovoltaica. *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, núm. 4, e03, 2021. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola.
<https://www.redalyc.org/journal/5862/586268743003/html/>
- Márquez Díaz, J. E., Prieto Moreno, A., Manrique Castro, M. A., & Sánchez Garzón, Óscar A. (2024). Sistema de riego automatizado para un cultivo de pequeña superficie. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 36(2), 32-45. <https://doi.org/10.37815/rte.v36n2.1227>
<https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/es/article/view/1227/803>
- Méndez Durán, Primera J. (2023). Diseño de un sistema solar aislado para bombear agua de uso agrícola en Esmeraldas, Ecuador. *Reincisol*, 2 (4), págs. 16 - 46.
[https://doi.org/10.59282/reincisol.v2\(4\)](https://doi.org/10.59282/reincisol.v2(4)) 16 – 46
https://www.researchgate.net/publication/372396114_Diseño_de_un_sistema_solar_aislado_para_bombear_agua_de_uso_agricola_en_Esmeraldas_Ecuador
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.
- Paredes, D, Carrillo, G, Paredes, A, Trujillo, D. Sistema de riego inteligente por aspersión utilizando energía fotovoltaica en la Universidad Técnica de Cotopaxi. DATEH. *Revista*

- Multidisciplinaria de Desarrollo Agropecuario, Tecnológico, Empresarial, y Humanista, ISSN-e 2773-7527, Vol. 1, N°. 2, 2019.
<https://investigacion.utc.edu.ec/index.php/dateh/article/view/736/1025>
- Paz, P y Echarri, A. 2022. Energía solar para riego con bombeo directo. Experiencia fotovoltaica en la finca experimental de Cadreita. Revista Navarra Agraria, 254.
<https://www.navarraagraria.com/categories/item/2000-energia-solar-para-riego-con-bombeo-directo>
- Pedraza, C. 2020. Proyecto de Riego Utilizando Energía Solar Para El Cultivo De Limones En La Finca Contador Del Municipio De Viani. Trabajo de grado. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. Programa Especialización en Gerencia Integral de Proyectos. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/57d2b630-6306-46ba-aafc-71e59c8d67b4/content>
- PILISO, P. (2017). DESIGN OF A MODEL FOR LOW COST SOLAR POWERED IRRIGATION SYSTEMS IN SOUTH AFRICA: LITERATURE REVIEW AND PROJECT PROPOSAL. <https://efwe.ukzn.ac.za/wp-content/uploads/2021/11/Piwe-Piliso2.pdf>
- Pineda, A. 2024. Diseño de sistema automatizado de riego, diseño de sistema solar fotovoltaico y análisis de riesgo eléctrico para huerta comunitaria en la comuna 1 de Medellín. Informe de Trabajo de grado. Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería. Medellín, Antioquia, Colombia.
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/47aeb8ca-dad7-4cbe-8ed0-849cb5293ad1/content>

- República de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Gaceta Constitucional No. 116 de 20 de julio de 1991.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). New York: Free Press.
- Scholten, M. (2024). Designing a Methodology for Optimized Small-scale Solar-drip Irrigation Systems in the Dominican Republic. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1879628&dswid=128>
- Sierra Castellanos, Nicolás (2021). 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.
- Valverde, A, Vargas, G, García, M y Díaz, E. Impacto de la implementación del sistema de riego usando energía solar en cultivos de limón. Rev. logos cienc. tecnol. vol.14 no.2 Bogotá May/Aug. 2022 Epub Aug 13, 2022. <https://doi.org/10.22335/rlct.v14i2.1571>
- Villalba, J. Diseño de un sistema de riego automático alimentado por energía solar fotovoltaica. 2023. Proyectos I+D (NRC 30132). <https://es.scribd.com/document/629616251/DISENO-DE-UN-SISTEMA-DE-RIEGO-AUTOMATICO-2-1>

Anexos

Anexo 1.

Consentimiento Informado

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Título del proyecto de investigación: Diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Investigador principal: Cristo Jesús Naranjo Charris

Nombre del investigador: Cedith Alfonso Zamora Padilla

Institución: Corporación Universitaria Reformada

Correo electrónico / teléfono de contacto: cristo.naranjo@unireformada.edu.co - 3007665630

Objetivo del estudio:

El propósito de esta investigación es Diseñar un prototipo de sistema de riego alimentado por energía fotovoltaica para optimizar el uso sostenible del agua en unidades agrícolas de pequeña escala del departamento del Atlántico. Para ello, se realizarán encuestas etnográficas que permitirán recoger información sobre las experiencias, percepciones y opiniones de los participantes en relación con sus procesos de riego en siembras de pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Procedimiento:

La participación consiste en una encuesta etnográfica que será de forma escrita y tendrá una duración de 20 a 30 minutos. La encuesta etnográfica será registrada de forma escrita con su consentimiento, con el fin de facilitar el análisis. Posteriormente, la información será transcrita y analizada con fines académicos e investigativos.

Confidencialidad:

Toda la información que usted proporcione será tratada con estricta confidencialidad. Los datos recolectados serán almacenados de manera segura y solo serán accesibles por el equipo investigador. Su identidad será protegida mediante el uso de seudónimos o códigos, y no se

específicamente en el diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica.

Consentimiento:

He leído y comprendido la información contenida en este documento. Se me ha dado la oportunidad de hacer preguntas y estas han sido respondidas satisfactoriamente. Acepto participar en la entrevista semiestructurada bajo las condiciones descritas.

Nombre del participante: _____

Firma del participante: _____

Fecha: _____

Firma del investigador: _____

Fecha: _____

Anexo 2.

Encuesta Etnográfica

#1 | Encuesta etnográfica

Diseño y construcción de un prototipo experimental de sistema de riego por goteo automatizado alimentado con energía fotovoltaica para pequeñas unidades agrícolas del departamento del Atlántico.

Nota importante: La siguiente encuesta etnográfica corresponden a la fase de validación social del prototipo. Los participantes fueron seleccionados de forma intencional entre agricultores de pequeña escala del departamento del Atlántico. Cada registro incluye la ficha de identificación, las respuestas textuales a las preguntas clave y una tabla comparativa de consumo de agua y energía estimado antes y después de la implementación del sistema.



Encuesta Etnográfica - Participante	
Ficha de Identificación	
Nombre:	
Fecha: 18/04/2026	
Municipio/Vereda:	
Ocupación:	
Años de experiencia: 10 años	
Cultivo:	
Consentimiento:	



Preguntas y Respuestas

1- ¿Cuál es el método de riego que utiliza actualmente?

Respuesta del participante:

2- ¿De qué fuente de energía depende para su sistema de riego?

Respuesta del participante:

3- ¿Qué dificultades presenta actualmente su forma de riego?

Respuesta del participante:

4- ¿Cuánto tiempo dedica al riego en un día o semana normal?

Respuesta del participante:

5- ¿Qué opinión tiene sobre el uso de energía solar en actividades agrícolas?

Respuesta del participante:

6- Luego de conocer el prototipo, ¿considera que podría ser útil para su cultivo?

Respuesta del participante: