



Facultad de ciencias de la vida

Dimensionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico para la agricultura a pequeña escala  
del cultivo de plátano en la Costa de Ecuador

VIDA - 460

**Proyecto Integrador**

Previo a la obtención del Título de:

**Ingeniería Agrícola y Biológica**

Presentado por:

Carlos André Reinoso Cervantes

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre Hennie Kelva Cervantes Fernández-Madrid y a mi padre Javier Fabrizzio Albán Pinargote, por haberme guiado a lo largo de mi vida, brindándome su apoyo incondicional y los valores necesarios que me han permitido llegar a ser la persona que soy hoy.

A mis hermanos Hennie, Doris y Sebastian, por su cariño constante y su apoyo incondicional, a mi perrita Gia y en memoria de mi perrita Mía, quienes me acompañaron en múltiples ocasiones durante las largas noches de trabajo y desarrollo de proyectos.

Finalmente, a mis compañeros, por el apoyo brindado a lo largo de nuestra carrera profesional y por compartir este camino de aprendizaje, y a mi mejor amigo Paul Cruz, por una vida de amistad y confianza.

## Agradecimiento

---

Mi más sincero agradecimiento a la Fundación Maquita Cushunchic, por permitirme realizar este proyecto con su equipo, brindándome la asistencia y el acceso a los recursos necesarios para su realización en el recinto San Gerardo.

Asimismo, mi sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Jaime Proaño, por su orientación y acompañamiento desde el inicio del proyecto, brindándome sus conocimientos y apoyo al desarrollo de este.

De igual manera, agradezco a mi pareja Fanny Sumba, por su compañía, paciencia y apoyo constante durante las largas noches de análisis y redacción.

Finalmente, agradezco este trabajo a Rodolfo Morán, compañero de trabajo, por su valiosa ayuda durante los viajes y las pruebas realizadas en el desarrollo de este proyecto.

## Declaración Expresa

---

Yo Carlos André Reinoso Cervantes acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, octubre del 2025.



Carlos André Reinoso Cervantes

## **Evaluadores**

---

**PhD. María Isabelita Jiménez Feijóo**

Profesor de materia

---

**Msc. Jaime Luis Proaño**

Tutor de proyecto

## Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño técnico y la evaluación de viabilidad de un sistema de riego por aspersión alimentado con energía solar para un cultivo de plátano a pequeña escala en la Costa del Ecuador, como alternativa al uso de sistemas dependientes de combustibles fósiles. La justificación del estudio se centra en optimizar el uso hídrico y energético en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron pruebas de campo orientadas a la caracterización del suelo, incluyendo ensayos de infiltración, retención de humedad y lecturas con tensiómetros. A partir de estos datos se calcularon la lámina neta de riego y la frecuencia de aplicación. Posteriormente, se analizaron tres alternativas de sistemas de bombeo fotovoltaico, considerando caudal, altura manométrica, disponibilidad de componentes y requerimientos energéticos, así como un análisis económico mediante indicadores financieros.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una lámina neta de riego de 26,7 mm y descartar una de las alternativas por limitaciones operativas, seleccionándose la opción más viable. Se concluye que el sistema propuesto es viable a largo plazo, reduce costos operativos y contribuye a una gestión sostenible del agua y la energía en la agricultura.

**Palabras clave:** energía renovable, gestión hídrica, agricultura sostenible, riego presurizado

## ***Abstract***

*This project aims to develop the technical design and evaluate the feasibility of a solar photovoltaic-powered sprinkler irrigation system for small-scale banana cultivation on the Ecuadorian coast, as an alternative to conventional systems dependent on fossil fuels. The study is justified by the need to optimize water and energy use in rural areas with limited access to the electrical grid and high production costs associated with traditional pumping systems.*

*For the development of the project, field tests were conducted to characterize soil conditions, including infiltration, soil moisture retention, and tensiometer measurements. Based on these data, the net irrigation depth and irrigation frequency were determined. Subsequently, three photovoltaic pumping system alternatives were analyzed, considering flow rate, total dynamic head, component availability, and energy requirements. An economic evaluation was also carried out using financial indicators to assess long-term viability.*

*The results allowed the determination of a net irrigation depth of 26.7 mm and the exclusion of one alternative due to operational limitations, identifying the most suitable option from a technical and economic perspective. It is concluded that the proposed system is viable in the long term, reduces operating costs, and contributes to sustainable water and energy management in agriculture.*

***Keywords:*** *renewable energy, water management, sustainable agriculture, pressurized irrigation*

## Índice general

Resumen.....	6
<i>Abstract</i> .....	7
Índice general.....	8
Abreviaturas.....	10
Simbologías.....	10
Índice de figuras.....	12
Índice de tablas .....	13
Capítulo 1.....	14
1.1 Introducción .....	14
1.2 Descripción del problema .....	14
1.3 Justificación del problema .....	15
1.4 Objetivos.....	16
<i>1.4.1 Objetivo general</i> .....	16
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i> .....	16
1.5 Marco Teórico .....	16
<i>1.5.1 Cultivo de plátano</i> .....	16

1.5.2 Métodos de riego agrícola para el plátano .....	18
1.5.3 Sistema de riego fotovoltaico .....	21
Capítulo 2.....	22
2. Metodología .....	22
2.1 Área de estudio.....	23
2.2 Cálculo de la demanda de riego .....	25
2.3 Selección de bomba de riego .....	29
2.4 Evaluación de viabilidad y sostenibilidad .....	29
Capítulo 3.....	30
3. Resultados y análisis .....	30
3.1 Cálculo de demanda de riego .....	30
3.2 Selección de bomba de riego .....	45
Capítulo 4.....	51
4.1 Conclusiones y recomendaciones .....	51
Referencias.....	52

## **Abreviaturas**

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

INAMHI – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

INEC – Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

PVC – Policloruro de Vinilo

UNEF – Unión Española Fotovoltaica

## **Simbologías**

C° – Celsius

cb – Centibar

cm – Centímetro

h – Hora

Ha – Hectárea

kPa – Kilopascal

L – Litros

m – Metro

mca – Metros de columna de agua

mm – Milímetro

## Índice de figuras

Figura 1 .....	19
Figura 2 .....	19
Figura 3 .....	22
Figura 4 .....	24
Figura 5 .....	24
Figura 6 .....	26
Figura 7 .....	27
Figura 8 .....	32
Figura 9 .....	33
Figura 10 .....	34
Figura 11 .....	36
Figura 12 .....	36
Figura 13 .....	40
Figura 14 .....	46
Figura 15 .....	46
Figura 16 .....	47
Figura 17 .....	48
Figura 18 .....	49
Figura 19 .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1.....	31
Tabla 2.....	31
Tabla 3.....	32
Tabla 4.....	34
Tabla 5.....	37
Tabla 6.....	38
Tabla 7.....	38
Tabla 8.....	39
Tabla 9.....	40
Tabla 10.....	41
Tabla 11.....	42
Tabla 12.....	45
Tabla 13.....	50

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

La agricultura es una de las actividades más importantes en el Ecuador, y familias dependen directamente de lo que producen en sus parcelas. De acuerdo con el ministerio de agricultura, ganadería y pesca, el plátano es el sexto cultivo más sembrado en el Ecuador con una superficie sembrada aproximada a 150.000 ha.

En el año 2024 la producción nacional alcanzó alrededor de 1.083 millones de toneladas, siendo Manabí la provincia líder en el cultivo, con una producción de 556.61 mil toneladas, concentrando más del 50% de la producción nacional en ese año.

Se identificó que uno de los principales problemas que enfrentan los pequeños agricultores es la dificultad para obtener agua de riego de forma económica y sostenible. Muchos dependen de bombas que funcionan con combustibles o no cuentan con acceso a electricidad, lo que incrementa los costos y afecta el rendimiento de los cultivos.

Ante esta situación, la energía solar fotovoltaica surge como una alternativa viable. La Costa ecuatoriana recibe buena radiación solar durante casi todo el año, lo que permite utilizar esta energía para bombear agua sin depender de combustibles ni de la red eléctrica.

## 1.2 Descripción del problema

Durante las actividades de campo se evidenció que una parte importante de los pequeños productores de la Costa ecuatoriana no dispone de sistemas de riego tecnificados para el manejo de sus cultivos de plátano. En varias comunidades, el abastecimiento de agua se realiza mediante

bombas accionadas por diésel o gasolina, lo que implica costos elevados y una dependencia permanente de estos combustibles.

Esta situación representa una limitación significativa para los agricultores, considerando que el cultivo de plátano requiere un suministro constante de humedad para su adecuado desarrollo. La insuficiencia de riego repercute directamente en la reducción de la productividad, incrementa el riesgo de pérdidas en la cosecha y afecta los ingresos de las familias productoras.

El problema central radica en la ausencia de un sistema de bombeo para riego que sea eficiente, económico y ambientalmente sostenible, y que pueda adaptarse a las condiciones de producción de los pequeños agricultores de la región.

### **1.3 Justificación del problema**

La importancia de este proyecto radica en la necesidad real que existe en las zonas agrícolas de la Costa ecuatoriana de contar con alternativas de riego que sean funcionales y accesibles para los pequeños productores. Frente a un contexto donde el uso de combustibles para el bombeo de agua sigue siendo común, el aprovechamiento de la energía solar aparece como una opción práctica para obtener agua sin depender de la red eléctrica ni asumir costos permanentes por diésel o gasolina.

Al mismo tiempo, el desarrollo del proyecto permite trasladar los conocimientos técnicos adquiridos a una situación concreta del entorno rural, donde su aplicación puede generar beneficios directos. Un sistema de bombeo solar adecuadamente diseñado tiene el potencial de mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo de plátano, reducir las pérdidas productivas y aportar a una mejora gradual en las condiciones de vida de las familias agricultoras.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

- Dimensionar técnica y económicamente un sistema de bombeo solar fotovoltaico para la irrigación de pequeñas parcelas agrícolas en la Costa de Ecuador, mediante una propuesta sostenible y rentable frente a los sistemas de bombeo tradicionales.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Calcular la demanda de agua de riego de la parcela a partir de la información del cultivo, las características del suelo y los datos climáticos de la zona.
- Seleccionar la bomba con la potencia y eficiencia adecuadas en función de los caudales y las alturas de bombeo requeridas.
- Determinar la cantidad y la configuración óptima de los paneles solares, tomando en cuenta la radiación solar y la temperatura de la zona de estudio, garantizando la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba durante las horas de sol.
- Evaluar la viabilidad y rentabilidad a largo plazo del sistema fotovoltaico mediante un análisis de costos de inversión y operación, comparándolos con los sistemas tradicionales (diésel o red eléctrica).

## **1.5 Marco Teórico**

### ***1.5.1 Cultivo de plátano***

El plátano es uno de los cultivos más relevantes de la agricultura ecuatoriana. De acuerdo con datos del Instituto nacional de estadística y censo (INEC, 2024), ocupa el sexto lugar dentro

de los cultivos con mayor superficie sembrada del país, con un total 153.662 Ha. Se cultiva principalmente en la región Costa, donde las condiciones climáticas favorecen su desarrollo, y constituye una fuente de ingreso para familias rurales.

En Ecuador se siembran tres variedades principales: Dominico, Dominico-Hartón y Barraganete. Las dos primeras se destinan sobre todo al autoconsumo y al mercado interno, mientras que el Barraganete se produce principalmente para exportación. En términos climáticos, las variedades Dominico y Dominico-Hartón crecen mejor a temperaturas alrededor de 22 °C, mientras que el Barraganete requiere valores cercanos a 29 °C para un desarrollo óptimo. Además, el cultivo necesita una distribución uniforme aproximada de 1800 mm de agua al año, ya sea mediante lluvia o riego (Fernandez et al., 2021).

El plátano es una planta herbácea perenne formada por órganos vegetativos como el rizoma, el pseudotallo y las hojas, además de la inflorescencia que corresponde a la parte reproductiva. El rizoma actúa como el verdadero tallo de la planta y a partir de él se originan las raíces y los brotes laterales, su sistema radicular es fasciculado y se distribuye principalmente en la capa superficial del suelo, conformado por raíces primarias, secundarias y terciarias. El pseudotallo está formado por vainas foliares superpuestas que le dan soporte a la planta y permiten la emergencia continua de nuevas hojas, la inflorescencia se forma cuando el meristemo apical cambia de su función vegetativa a reproductiva, emergiendo a través del pseudotallo para dar origen a las flores femeninas y masculinas, de las cuales se desarrolla el racimo (Sandoval, J. & Muller, L. 1999)

En la provincia del Guayas, el plátano ocupa una superficie agrícola considerable y se cultiva bajo distintas condiciones agroecológicas. El riego es un elemento clave para el rendimiento del cultivo, especialmente en zonas donde la disponibilidad natural de agua es

limitada o irregular. La propagación del cultivo se realiza mediante reproducción vegetativa, utilizando hijos o cormos extraídos del rizoma, y se recomienda un espaciamiento entre plantas de  $2.5 \times 2.5$  m o  $3 \times 3$  m, con densidades menores a 2 000 plantas por hectárea para garantizar una adecuada aireación y exposición solar (Fernandez et al., 2021).

### ***1.5.2 Métodos de riego agrícola para el plátano***

La irrigación es el proceso mediante el cual se complementa el agua que reciben los cultivos cuando la lluvia resulta insuficiente o irregular, su función es mantener la humedad en la zona radicular para que las plantas puedan desarrollarse sin estrés hídrico. Existen varios métodos para aplicar el riego; entre ellos, el sistema por gravedad, que aprovecha el desnivel del terreno para que el agua avance e infiltre de manera natural, y el sistema por aspersión, donde el agua se impulsa bajo presión y cae en forma de lluvia, lo que permite cubrir la superficie del cultivo de manera más uniforme (Briceño et al., 2012).

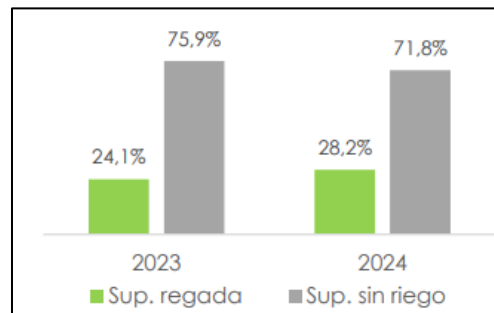
Además de estos métodos, se utilizan sistemas más precisos como el goteo y la microaspersión. En el riego por goteo, el agua llega directamente al suelo a través de pequeños emisores que liberan caudales bajos y constantes, creando un bulbo de humedad que mejora el aprovechamiento del agua. La microaspersión, distribuye gotas finas dentro de un área mediante emisores pequeños que operan con presiones moderadas. Ambos métodos permiten una aplicación más controlada del agua y se consideran más eficientes frente a los sistemas tradicionales (Briceño et al., 2012).

De acuerdo con la información del “Boletín técnico: módulo de información agroambiental y tecnificación 2024” publicado por la INEC, en el año 2024 Ecuador contaba con 1.3 millones de

ha de superficie cultivada con riego para los cultivos, lo cual representa un 28.2% de la superficie cultivada ese año (Pilataxi, 2025).

### Figura 1

*Superficie agropecuaria bajo riego, 2024*



*Nota.* Imagen tomada de boletín elaborado por Pilataxi (2025)

En Ecuador los principales métodos de riego son riego por gravedad (44.6% de la superficie con sistema de riego) y por aspersión (35.3% de la superficie con sistema de riego). Con menor presencia se encuentra el sistema de riego por microaspersión (11.3% de la superficie con sistema de riego) y finalmente otros sistemas de riego (8.8% de la superficie con sistema de riego) que incluye el riego por goteo, nebulización, etc. (Pilataxi, 2025).

### Figura 2

*Distribución de superficie de riego por aplicación*

<b>Método de riego</b>	<b>Superficie Regada</b>	<b>Porcentaje</b>
Surcos-Inundación	579.304	44,6%
Aspersión	458.275	35,3%
Micro aspersión	146.075	11,3%
Otro <sup>2</sup>	114.579	8,8%
<b>TOTAL</b>	<b>1.298.233</b>	<b>100,0%</b>

*Nota.* Imagen tomada de boletín elaborado por Pilataxi (2025)

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO, s.f.), en las plantaciones comerciales de plátano el sistema de riego que más se utiliza es la aspersión, ya que permite una distribución uniforme del agua y funciona bien en áreas amplias, en segundo lugar, se emplea el riego por cuenca o inundación, un método práctico en zonas donde se necesita ayudar al drenaje durante los periodos de lluvias intensas. Finalmente, los sistemas presurizados como el goteo y la microaspersión se usan con menor frecuencia en plátano.

De acuerdo con López et al. (2025), los requerimientos hídricos del plátano varían conforme avanza el desarrollo del cultivo. Durante las primeras ocho semanas, el consumo promedio es de 11,3 mm semanales. En la semana 9, coincidiendo con el alargamiento de los entrenudos, la demanda disminuye ligeramente a 10,4 mm. A partir de la semana 18, cuando la planta incrementa su desarrollo foliar y se prepara para la fase reproductiva, el requerimiento sube a 13,1 mm por semana.

En la etapa de iniciación floral, alrededor de la semana 20, la demanda asciende a un promedio de 20,8 mm semanales, aumentando progresivamente hasta llegar a 27,3 mm en la fase R5, correspondiente al desarrollo de la bellota, aproximadamente en la semana 30. Finalmente,

entre las semanas 34 y 45, siendo el periodo con mayor exigencia hídrica, el cultivo requiere alrededor de 26,5 mm de agua por semana (López et al., 2025).

### ***1.5.3 Sistema de riego fotovoltaico***

Según la Unión Española Fotovoltaica (2021), el riego fotovoltaico se fundamenta en el uso de la energía solar para el funcionamiento de sistemas de bombeo de agua aplicados a la actividad agrícola, mediante paneles solares que captan la radiación solar y la transforman en energía eléctrica para accionar bombas superficiales o sumergibles. Esta forma de riego ha ido ganando importancia en zonas rurales donde el acceso a la electricidad es limitado o inexistente, y donde el uso de combustibles convencionales incrementa significativamente los costos de operación, posicionándose así como una alternativa sostenible para garantizar el suministro de agua en la producción agrícola.

De acuerdo con Fajardo (2021), estos sistemas de riego ya se han aplicado en otros países en diferentes cultivos y condiciones, en India, en el 2003, se implementaron sistemas de riego fotovoltaico para viñedos, reduciendo los costos de riego y asegurando disponibilidad de agua durante la temporada seca. En Perú, en el 2018, se aplicó un sistema de riego fotovoltaico para maíz, trigo y hortalizas.

En Ecuador también se ha implementado este tipo de sistemas, en la provincia de Cañar se desarrolló un sistema de bombeo fotovoltaico para plantaciones de banano con el objetivo de promover la transición hacia fuentes de energía renovables (Salazar y Lata, 2025), y en la provincia de Cotopaxi se realizó un sistema fotovoltaico de microaspersión para los cultivos de café y cacao (Mera y Quinteros, 2020).

En el trabajo desarrollado por Simbaña et al. (2024) se evaluó la aplicación de un sistema de riego por goteo que funciona con energía solar en invernaderos ubicados en la ciudad de Quito, a partir del cual se evidenciaron mejoras relevantes asociadas al funcionamiento del sistema y a los costos de operación. La sustitución del riego alimentado por la red eléctrica convencional por un sistema de bombeo fotovoltaico permitió una reducción significativa de los gastos, alcanzando valores cercanos al 70 %. Además, el sistema incorporó un inversor y una batería, lo que hizo posible almacenar energía y mantener el riego de manera continua incluso en días con baja radiación solar, evitando así interrupciones en el suministro de agua para los cultivos.

En cuanto al ámbito productivo, la disponibilidad constante de agua favoreció un crecimiento más uniforme de los cultivos y mejoró la salud de las plantas. Al mantener niveles óptimos de humedad y disminuir el estrés hídrico, los cultivos se volvieron menos susceptibles a plagas y enfermedades, lo que permitió reducir el uso de pesticidas y fertilizantes. Desde el punto de vista ambiental, el sistema contribuyó a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y la huella de carbono asociada al riego, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles (Simbaña et al., 2024).

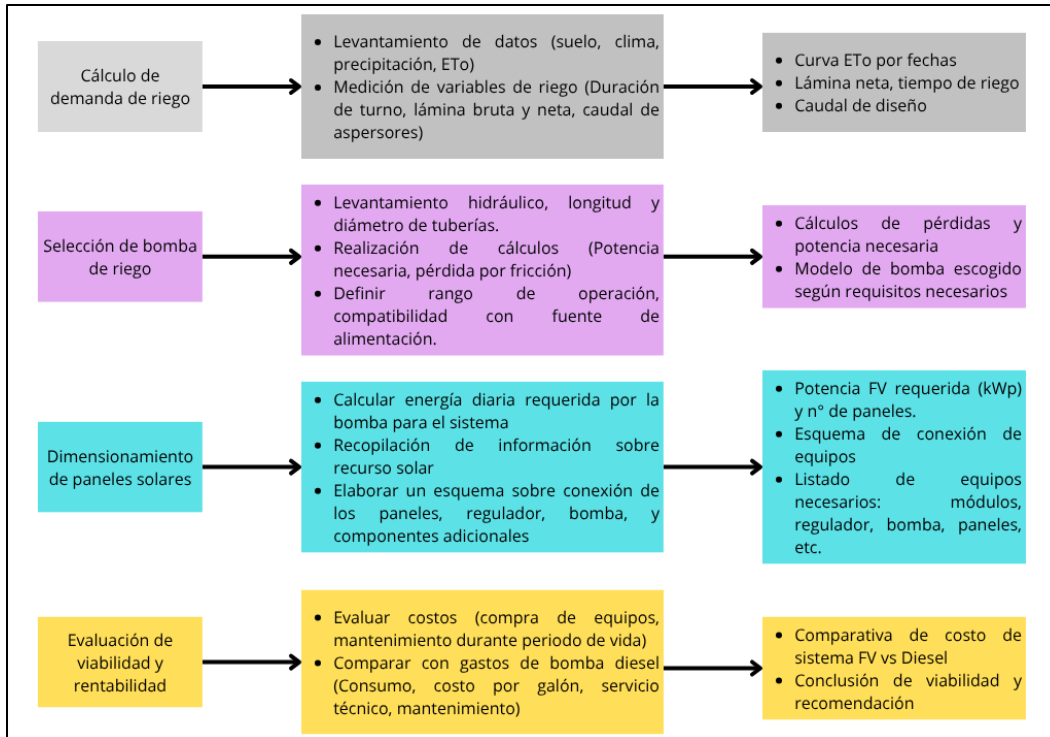
## **Capítulo 2**

### **2. Metodología**

Los factores que influyen en el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico se dividieron en 4 fases principales para el cumplimiento de los objetivos propuestos. La Figura 3 muestra cada fase, junto con las actividades y los resultados obtenidos.

#### **Figura 3**

*Flujograma de pasos a seguir para metodología*



*Nota.* Pasos para elaboración de dimensionamiento de sistema de riego fotovoltaico

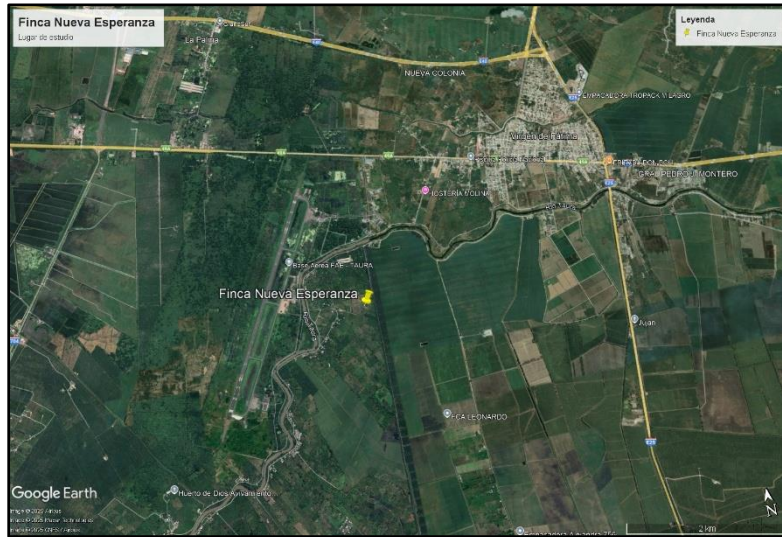
## 2.1 Área de estudio

El estudio fue realizado en una finca agrícola en el cantón Yaguachi perteneciente a la provincia del Guayas en los meses de Octubre-Diciembre del 2025. La primera visita se presenta en el **Apéndice A**

- **Provincia:** Guayas
- **Cantón:** Yaguachi
- **Recinto:** San Gerardo

## Figura 4

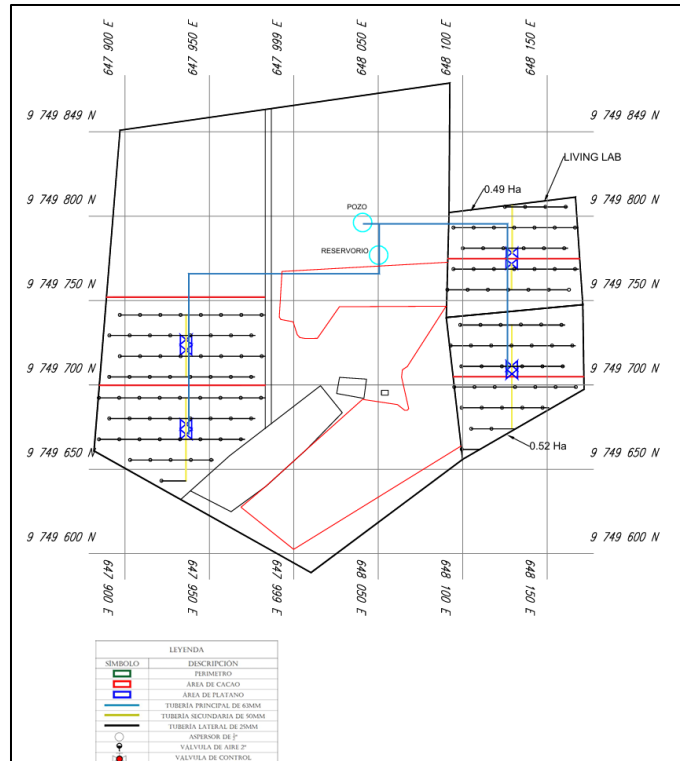
*Ubicación de finca agrícola*



*Nota.* Mapa de la finca realizado en Google Earth

## Figura 5

*Mapeo digital de finca nueva esperanza*



*Nota.* Sistema de riego preexistente en finca agrícola

## 2.2 Cálculo de la demanda de riego

Para determinar cuánta agua necesita el cultivo de plátano durante su ciclo se recopilaron datos del clima de la zona:

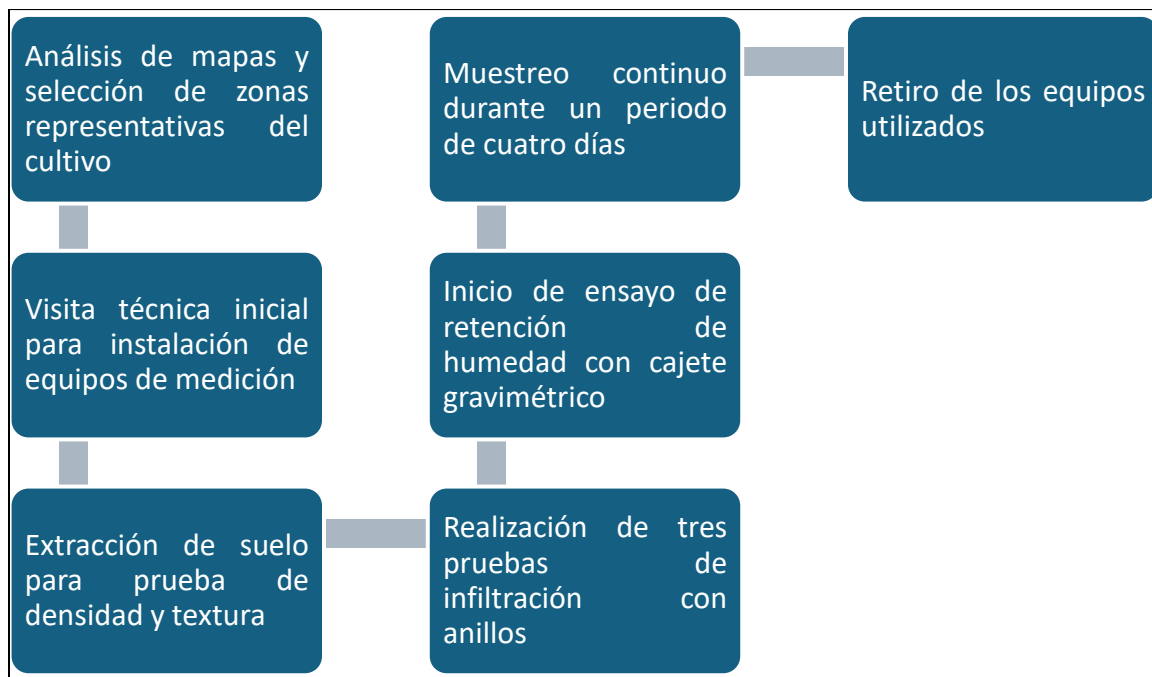
- Precipitación
- Temperatura
- Humedad
- Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

Utilizando información climática histórica y bases como los datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

Para determinar las características del suelo, tales como la capacidad de retención, infiltración de agua, textura y densidad se realizaron varias visitas de campo con el fin de recopilar la información necesaria. Posteriormente, se elaboró un flujograma para la recolección de datos, el cual sirvió como una guía visual para representar la secuencia de actividades desarrolladas durante esta etapa.

**Figura 6**

*Flujograma de actividades para recolección de datos*



*Nota.* El flujograma describe las actividades realizadas para la obtención de datos necesarios para el cálculo de la demanda de riego.

Para la caracterización del suelo de la zona de estudio se realizaron varias pruebas de campo y laboratorio, con el fin de conocer sus propiedades físicas y su comportamiento frente al riego. Estas pruebas incluyeron análisis de textura, densidad aparente, infiltración y retención de humedad del suelo.

La determinación de la textura del suelo se realizó mediante la extracción de muestras en la profundidad de 0 a 30 cm. La muestra fue analizada utilizando el método de la Jarra de Mason, que consiste en la dispersión del suelo en agua para permitir la sedimentación de las partículas según su tamaño. A partir de la lectura visual de las capas formadas se estimaron los porcentajes de arena, limo y arcilla, lo que permitió clasificar el tipo de suelo presente en la finca. La recolección de la muestra se puede visualizar en el **Apéndice A**.

Para la obtención de los parámetros físicos del suelo, incluida la densidad aparente, se utilizó los porcentajes de arena, limo y arcilla determinados previamente en la prueba de textura, los cuales fueron ingresados en una herramienta digital de cálculo textural denominado “Soil Water Characteristics”. A partir de esta información se estimaron propiedades como el punto de marchitez, la capacidad de campo, la densidad aparente, la saturación, la conductividad hidráulica y el agua disponible del suelo, permitiendo caracterizar de manera integral el comportamiento físico e hidráulico del suelo presente en la zona de estudio. Estos valores fueron utilizados posteriormente para el análisis de la retención de humedad y el cálculo de la demanda de riego.

## **Figura 7**

*Software “Soil Water Characteristics”*



agua en los aspersores y el caudal suministrado por el sistema, con el fin de evaluar el funcionamiento hidráulico y comprobar que la bomba actual fuese capaz de proporcionar la presión y el caudal requeridos para la operación del sistema de riego. La medición del caudal y la presión de los aspersores se pueden visualizar en el **Apéndice A**.

### ***2.3 Selección de bomba de riego***

Una vez determinada la demanda de agua del cultivo, se procedió a la selección de la bomba de riego adecuada. Para ello se realizó un levantamiento previo en el terreno, en el cual se midió la distancia entre la fuente de agua y el área de cultivo, el desnivel que debía vencer la bomba y el recorrido de las tuberías utilizadas, considerando tubería de PVC.

Con esta información se calculó la altura manométrica total del sistema, la cual incluye tanto la altura estática como las pérdidas de carga ocasionadas por fricción en las tuberías y accesorios. A partir del caudal requerido y la altura manométrica total, se determinó la potencia hidráulica necesaria para el bombeo.

Adicionalmente, se analizaron distintos modelos de bombas disponibles en el mercado con el objetivo de seleccionar una que fuera compatible con un sistema fotovoltaico. A continuación, se definieron los principales componentes complementarios del sistema, como el regulador de carga, el inversor y, en caso de ser necesario, baterías para el almacenamiento de energía.

### ***2.4 Evaluación de viabilidad y sostenibilidad***

La última etapa de la metodología consistió en evaluar la viabilidad económica y ambiental del sistema de riego fotovoltaico propuesto. Para ello se estimaron los costos asociados a la adquisición, instalación y mantenimiento de los equipos a lo largo de su vida útil.

Estos costos fueron comparados con los gastos operativos de un sistema de riego convencional basado en una bomba diésel, considerando el consumo de combustible, mantenimiento y costos asociados a su operación. Este análisis permitió estimar los posibles ahorros económicos y el tiempo aproximado de recuperación de la inversión inicial.

## Capítulo 3

### 3. Resultados y análisis

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas de campo realizadas en la zona de estudio, las cuales permitieron caracterizar las condiciones físicas e hídricas del suelo. Se exponen los principales hallazgos relacionados con la infiltración, retención de humedad, textura y densidad aparente del suelo, analizando su comportamiento en diferentes profundidades.

Asimismo, se interpretan los resultados obtenidos y su relación con el manejo del riego agrícola, destacando aquellos aspectos que influyen directamente en la eficiencia del sistema de riego propuesto. Estos análisis constituyen la base técnica para la toma de decisiones en el diseño del sistema de riego fotovoltaico.

#### *3.1 Cálculo de demanda de riego*

**Datos climáticos de la zona.** Para el desarrollo del estudio fue necesario analizar las condiciones climáticas de la zona donde se ubica la parcela agrícola. Por ello, se recopilaron datos de temperatura, humedad, precipitación y evapotranspiración, los cuales presentan el

comportamiento climático de la zona y posteriormente analizar su influencia en el requerimiento de agua del cultivo. Estos datos se presentan de manera resumida en la siguiente tabla.

Los registros climáticos empleados corresponden al período 1965–1984 y fueron tomados de la estación meteorológica más próxima a la zona de estudio, debido a que presenta datos representativos de las condiciones climáticas.

**Tabla 1**

*Datos climáticos Yaguachi (1965-1984)*

DATO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MEDIA (°C)	26,1	26,2	26,6	26,7	25,9	24,9	24,0	24,1	24,5	24,6	25,2	26,0	25,4
TEMPERATURA MAX. MEDIA	31,2	31,0	31,4	31,0	30,4	30,0	29,3	29,7	30,4	30,5	30,9	31,5	30,6
TEMPERATURA MIN. MEDIA	22,8	23,3	23,6	23,9	22,8	21,7	20,6	20,5	20,9	20,9	21,3	22,3	22,1
HUMEDAD RELATIVA MED. (%)	80	83	82	82	82	83	81	79	78	79	78	79	81
PRECIPITACION (mm)	143,5	215,7	274,1	133,6	37,7	3,8	0,5	0,0	1,0	1,5	0,9	17,1	829,4
PRECIPITACION MAX 24hs (mm)	117,0	98,3	160,9	225,3	145,5	28,6	10,0	2,4	10,1	17,2	59,6	91,0	225,3
EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm/día)	2,94	3,02	3,30	3,27	2,93	2,54	2,62	2,87	3,11	2,96	3,14	2,97	1084,65
EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm/mensual)	91,14	84,56	102,3	98,1	90,83	76,2	81,22	88,97	93,3	91,76	94,2	92,07	1084,65

*Nota.* Datos climáticos obtenido del INAMHI

Posteriormente, esta información fue complementada con datos climáticos recientes obtenidos de la base de datos satelital NASA POWER, específicamente para la estimación de las horas solar pico en la zona de estudio. Al comparar estos valores con los registros históricos de la estación meteorológica seleccionada, se observó una diferencia mínima, lo que indica que, para las variables analizadas, las condiciones climáticas locales no presentan variaciones significativas que afecten el diseño del sistema de riego fotovoltaico.

**Tabla 2**

*Hora solar pico en zona de estudio*

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
SI_TILTED_AVG_LATITUDE	3,36	3,23	3,43	3,66	3,39	3,26	3,37	3,63	3,78	3,53	3,63	3,55	3,48

*Nota.* Datos climáticos extraídos de Nasa Power

**Resultados de pruebas de campo.** A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de campo realizadas en sitio de estudio, las cuales permitieron caracterizar el comportamiento del suelo. En primer lugar, se muestran los resultados de las pruebas de textura, ya que estas son fundamentales para comprender la capacidad del suelo de absorber agua y definir el manejo adecuado del riego.

En la primera prueba se realizó la determinación de la textura del suelo a partir de los datos obtenidos durante la prueba de campo. Luego de efectuar la lectura de la muestra en el recipiente, se identificaron los porcentajes correspondientes a las diferentes fracciones del suelo presentes.

**Tabla 3**

*Porcentajes de contenido textural*

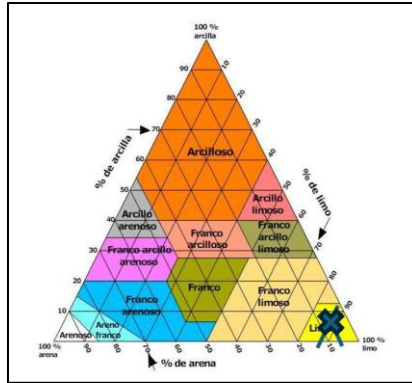
	<b>Medición (cm)</b>	<b>Contenido (%)</b>
<b>Arena</b>	0,5	7,25%
<b>Limo</b>	6,1	88,41%
<b>Arcilla</b>	0,3	4,35%
<b>Total</b>	6,9	100,00%

*Nota.* Porcentajes de textura en profundidad 0-30cm

Estos valores fueron comparados con el triángulo textural, lo que permitió clasificar y definir la textura del suelo existente en el sector evaluado.

**Figura 8**

*Triángulo textural de suelo*

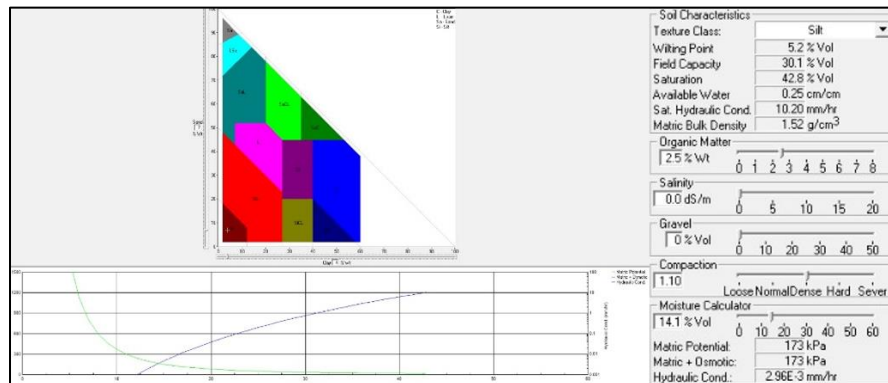


*Nota.* Identificación de suelo en el triángulo textural

A partir del análisis de la información obtenida en campo y del procesamiento de los datos texturales, se determinaron los principales parámetros físicos e hidráulicos del suelo en la zona de estudio. Los resultados obtenidos se presentan a continuación y permiten describir las condiciones del suelo.

**Figura 9**

*Software “Soil Water Characteristics”*



*Nota.* Cálculo de características de suelo por medio de la textura

**Tabla 4**

*Datos proporcionados por Soil Water Characteristics*

<b>Característica</b>	<b>Dato</b>	<b>Unidad</b>
Textura	Limoso	
Punto de marchitez	5,2	%
Capacidad de campo	30,1	%
Saturación	42,8	%
Agua disponible	0,25	cm/cm
Conductividad hidráulica	10,2	mm/h
Densidad aparente	1,52	g/cm <sup>3</sup>

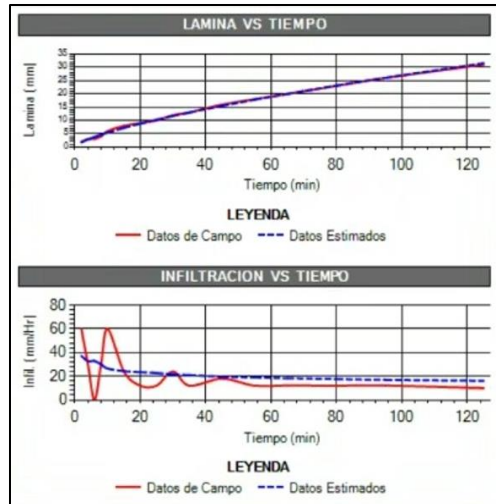
*Nota.* Datos de suelo a profundidad 0-30 cm

En la tercera prueba, se presentan los siguientes resultados obtenidos en campo. Los datos registrados fueron ajustados utilizando el software de “Kostiakov”, el cual mostró un buen comportamiento para describir la infiltración del suelo en la zona de estudio. El ajuste del modelo presentó un coeficiente de correlación de  $r = 0,9943$ , lo que indica una alta concordancia entre los datos medidos en campo y los valores estimados.

A partir del análisis se determinó una velocidad básica de entrada del agua al suelo de **9,36 mm/h**, valor que representa la tasa a la cual el suelo permite el paso del agua una vez alcanzada una condición casi estable. Los gráficos de lámina acumulada en función del tiempo y de velocidad de entrada del agua permiten observar el comportamiento inicial del suelo, caracterizado por valores elevados, y su posterior estabilización conforme avanza el ensayo.

**Figura 10**

*Gráfico de primera prueba de retención*



*Nota.* Gráfico realizado con el software “Kostiakov”

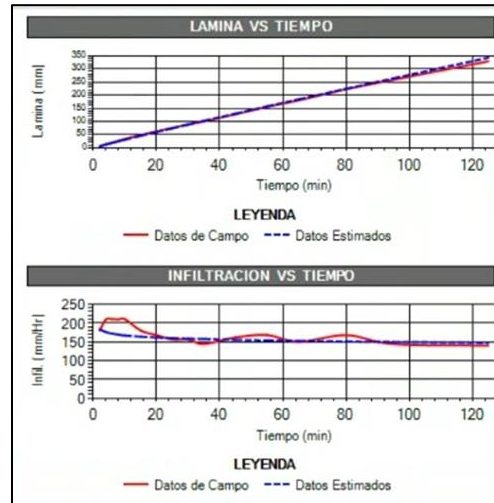
En esta segunda prueba de infiltración se observó un comportamiento distinto del suelo respecto a la prueba anterior. El ajuste de los datos mediante el software de “Kostiakov” presentó un coeficiente de correlación de  $r = 0,999$ , lo que confirma una muy buena relación entre los valores medidos en campo y los estimados por el modelo. Sin embargo, los parámetros obtenidos evidencian una mayor capacidad de infiltración en esta zona evaluada.

La velocidad de infiltración básica determinada fue de **167,21 mm/h**, valor considerablemente superior al obtenido en la primera prueba. Los gráficos de lámina infiltrada y velocidad de infiltración muestran tasas iniciales elevadas que tienden a estabilizarse en un corto período de tiempo, indicando una rápida respuesta del suelo al ingreso de agua.

Esta diferencia marcada entre ambas pruebas refuerza la necesidad de contar con más de un punto de medición para caracterizar adecuadamente el comportamiento hidráulico del suelo. Por ello, los resultados de la tercera prueba permitieron confirmar y complementar la información obtenida, aportando mayor seguridad al análisis de infiltración realizado

## Figura 11

*Gráfico de segunda prueba de retención*

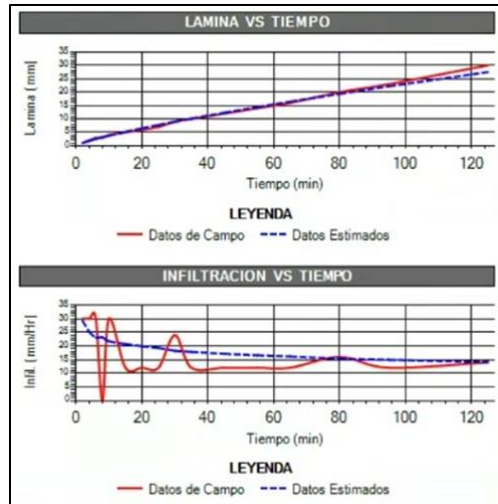


*Nota.* Gráfico realizado con el software “Kostiakov”

En la tercera prueba de infiltración se obtuvo nuevamente un comportamiento del suelo similar al observado en la primera medición. El ajuste de los datos mediante el software de “Kostiakov” presentó un coeficiente de correlación de  $r = 0,9971$ , lo que indica una adecuada representación del proceso de infiltración a partir de los datos de campo. La velocidad de infiltración básica determinada para esta prueba fue de **10,29 mm/h**, valor cercano al registrado en la primera prueba.

## Figura 12

*Gráfico de tercera prueba de retención*



*Nota.* Gráfico realizado con el software “Kostiakov”

Al comparar los resultados de las tres pruebas realizadas, se evidencia que la segunda prueba presenta valores de infiltración significativamente mayores, mientras que la primera y la tercera muestran comportamientos similares, tanto en la tendencia de las curvas como en los valores de infiltración básica. Esta similitud sugiere que las condiciones del suelo evaluadas en la primera y tercera prueba son más representativas del área de estudio.

Por esta razón, para el análisis posterior y el diseño del sistema de riego, se consideró óptimo calcular la infiltración básica promedio a partir de los valores obtenidos en la primera y tercera prueba, con el fin de reducir variaciones y obtener un valor más confiable que represente el comportamiento del suelo en condiciones normales.

## **Tabla 5**

*Resumen de pruebas de infiltración*

Prueba	Coefficiente de correlación (r)	Infiltración básica (mm/h)	Observación
Prueba 1	0,9943	9,36	Comportamiento representativo del suelo
Prueba 2	0,999	167,21	Valor atípico, infiltración elevada
Prueba 3	0,9971	10,29	Comportamiento similar a la Prueba 1
<b>Promedio (P1 y P3)</b>	—	<b>9,83</b>	Valor adoptado para el diseño

*Nota.* Promedio elaborado a base de pruebas de infiltración con valores similares

Se presentan los resultados correspondientes a la prueba de retención de humedad del suelo, incluyendo los porcentajes de humedad obtenidos en las muestras y las lecturas de los tensiómetros instalados, con el fin de analizar la variación del contenido de agua en el perfil del suelo.

**Tabla 6**

*Datos de retención de humedad*

0-20 cm	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
<b>Peso húmedo</b>	74 g	75 g	82 g	78 g
<b>Peso Seco</b>	58 g	61 g	67 g	64 g
<b>% de humedad</b>	27,58%	22,95%	22,39%	21,88%

*Nota.* Datos a primera profundidad 0-20 cm

**Tabla 7**

*Datos de retención de humedad*

20-45 cm	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
<b>Peso húmedo</b>	69 g	88 g	92 g	116 g
<b>Peso seco</b>	54 g	71 g	75 g	95 g
<b>% de humedad</b>	27,77%	23,94%	22,66%	22,10%

*Nota.* Datos a primera profundidad 20-45 cm

Los resultados evidencian una disminución progresiva del contenido de humedad en ambas profundidades a lo largo de los cuatro días de evaluación. En la capa de 0–20 cm la pérdida de humedad fue ligeramente superior, lo que puede asociarse a una mayor influencia de la evaporación y a una menor capacidad de retención en la zona superficial del suelo. En la profundidad de 20–45 cm la variación fue inferior, manteniendo valores de humedad ligeramente superiores, lo que indica una mayor estabilidad hídrica en capas más profundas.

Los resultados obtenidos a partir de las lecturas de los tensiómetros instalados se registraron cada 24 horas durante un período de tres días posteriores a la saturación del suelo. Las mediciones se expresaron en la unidad cb/kPa, la cual representa la tensión del agua en el suelo. Estas lecturas permiten analizar la variación de la disponibilidad de agua en el perfil del suelo a lo largo del tiempo. A continuación, se presentan los valores registrados para cada profundidad evaluada.

### **Tabla 8**

*Lectura de tensiómetros*

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
<b>30 cm</b>	18	35	43	46
<b>45 cm</b>	20	34	38	42

*Nota.* Datos de tensiómetros a dos profundidades

De acuerdo con las lecturas obtenidas, se considera que cuando los valores registrados por los tensiómetros superan el umbral de 40 cb/kPa, el suelo entra en una condición de estrés hídrico, lo que dificulta la absorción de agua por parte del cultivo.

Como referencia inicial, se obtuvieron los valores teóricos de caudal en función de la presión de operación de los aspersores a partir del catálogo técnico del fabricante, el cual establece la relación entre estas variables mediante la ecuación característica del aspersor. Esta información permitió contar con valores base para el análisis del desempeño hidráulico del sistema y sirvió como criterio de comparación frente a los resultados medidos en campo.

### **Tabla 9**

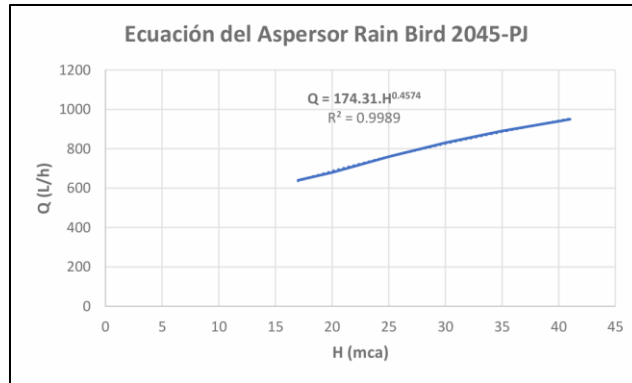
*Caudales y presiones de aspersor Rain Bird*

<b>H (mca)</b>	<b>Q (l/h)</b>
17	640
20	680
25	750
30	830
35	890
40	940
41	950

*Nota.* Información brindada por fabricante

### **Figura 13**

*Ecuación del aspersor Rain Bird 2045-PJ*



*Nota.* Información brindada por fabricante

Posteriormente, se realizaron mediciones en campo para determinar el caudal real suministrado por los aspersores bajo diferentes condiciones de presión. Las lecturas se efectuaron directamente en los puntos de salida del agua, registrando tanto la presión de operación como el caudal correspondiente. Los valores obtenidos reflejan el comportamiento real del sistema durante su funcionamiento y permiten evaluar la respuesta de los aspersores bajo las condiciones del diseño.

**Tabla 10**

*Caudales y presiones de aspersor Rain Bird*

<b>Aspersor</b>	<b>Q (l/h)</b>	<b>H (Bar)</b>	<b>H (mca)</b>
1	657,25	1,6	16
2	709,27	1,8	18
3	713,86	2	20
4	725,54	2	20

*Nota.* Datos tomados en campo

El cálculo teórico del caudal se realizó considerando una presión de operación de 20 mca, por ser el valor más representativo del funcionamiento del sistema, lo que permitió comparar los resultados teóricos con las mediciones obtenidas en campo.

$$Q_{teórico} = 174.31 * (20 \text{ mca})^{0.4574} = 686.14 \text{ L/h}$$

*Nota.* Ecuación teórica del caudal provida por el fabricante

### Tabla 11

#### *Análisis de desviación*

Parámetro	Valor obtenido en campo	Valor obtenido en ecuación	Desviación	Desviación (%)
Caudal (Q)	719,7 L/h	686,14 L/h	33,16 L/h	4,89

*Nota.* Comparación de datos brindados por el proveedor y datos tomados en campo

La diferencia obtenida entre los valores teóricos del fabricante y las mediciones realizadas en campo fue del 4,89 %, lo cual demuestra que el comportamiento del aspersor en condiciones reales es muy similar al esperado. Por esta razón, la ecuación del fabricante puede utilizarse con confianza para el análisis del sistema de riego.

**Cálculo de demanda de riego.** Para el cálculo de la demanda de riego del cultivo fue necesario determinar la humedad aprovechable del suelo, la cual representa la cantidad de agua disponible para las plantas entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Este parámetro es fundamental para definir la lámina de riego y establecer una programación adecuada

del riego, ya que permite conocer el volumen de agua que puede ser almacenado en el suelo y utilizado por el cultivo

### ***Humedad aprovechable***

$$HA = (CC - PMP) * Da * z$$

Donde:

**HA** = Humedad aprovechable (cm)

**CC** = Capacidad de campo (%)

**PMP** = Punto de marchitez permanente (%)

**Da** = Densidad aparente

**Z** = Profundidad a considerar de suelo en cm

$$HA = (0.301 - 0.052) * 1.52 * 20$$

$$HA = 7.57 \text{ cm}$$

Para el cálculo de la demanda de riego se consideró una profundidad de 20 cm, correspondiente a la zona del suelo donde se concentra la mayor actividad radicular del cultivo y donde las lecturas de tensiómetros y las pruebas de retención de humedad mostraron mayores variaciones. Además, al tratarse de riego por aspersión, esta capa es la más directamente influenciada por la aplicación del agua, por lo que resulta representativa para la programación del riego.

Para definir el factor de la lámina de riego, que representa la cantidad de agua del suelo que puede utilizar el cultivo antes de volver a regar, se tomaron en cuenta los resultados de la prueba de retención de humedad y las lecturas de los tensiómetros. Con esta información se determinó el nivel de humedad a partir del cual el suelo comienza a presentar estrés hídrico, lo que sirvió como referencia para establecer el momento adecuado de riego.

### ***Porcentaje de humedad aprovechable***

$$HA(\%) = CC - PMP$$

$$HA(\%) = 30.1 - 5.2 = 24.9\%$$

El factor se determinó considerando la diferencia entre la capacidad de campo y dicho contenido de humedad, en relación con el total de agua aprovechable del suelo, obteniendo así un valor representativo de las condiciones reales del suelo en la zona de estudio.

### ***Factor $f$***

$$f = \frac{30.1 - 21.88}{24.9} * 100 = 0.3$$

Una vez determinada la humedad aprovechable del suelo y el factor  $f$ , estos valores fueron utilizados para calcular la lámina neta de riego que debe aplicarse al cultivo, la cual representa la cantidad de agua necesaria para reponer la fracción de humedad consumida y mantener condiciones adecuadas de disponibilidad hídrica en el suelo.

### ***Lámina de riego (neta)***

$$Lámina\ de\ riego = f * HA = 7.57 * 0.3$$

$$\text{Lámina de riego} = 2.27\text{cm} = 22.7\text{mm}$$

*Lámina de riego (Bruta)*

$$\text{Lámina de riego} = L_n/E_f = 22.7/0.85$$

$$\text{Lámina de riego} = 26.7 \text{ mm}$$

La demanda de riego calculada fue de 26.7 mm, la cual, en función del comportamiento del suelo observado mediante los tensiómetros y la capacidad de uso diario de la bomba, debe aplicarse con una frecuencia de riego saltando 3 días para evitar condiciones de estrés hídrico en el cultivo y según el tiempo de uso diario de la bomba. Esta programación también responde al diseño operativo del sistema, el cual se encuentra dividido en cuatro módulos de irrigación, lo que permite la aplicación secuencial del agua, atendiendo un módulo por día y garantizando así una distribución eficiente del agua en toda el área cultivada.

### ***3.2 Selección de bomba de riego***

La selección de la bomba se basó en la elección de una alternativa energética con características hidráulicas similares a la bomba actual, dado que las pruebas de presión y los cálculos de la lámina de riego demostraron que esta abastece adecuadamente al cultivo. A partir de estos resultados, se definieron los parámetros técnicos requeridos para la bomba.

### **Tabla 12**

*Configuración actual de bomba a gasolina*

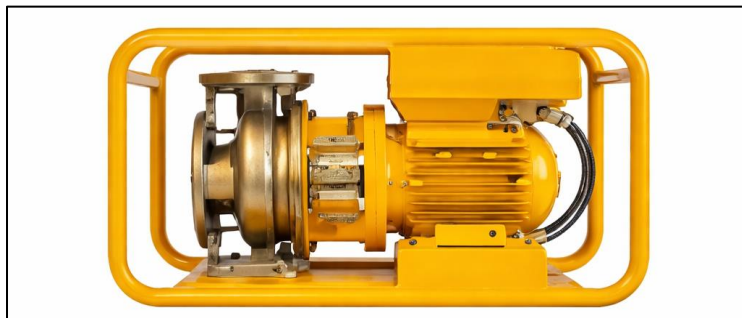
Altura	Caudal
26 mca	216,7l/min

*Nota.* Medición a bomba de riego en campo

**Opción 1.** La Opción 1 corresponde a un sistema de bombeo solar directo, compuesto por una bomba fotovoltaica marca Ennos y un kit de paneles solares, diseñado para operar exclusivamente durante las horas solares pico.

### **Figura 14**

*Bomba Solar ENNOS*



*Nota.* Imagen de la bomba brindada por proveedor

### **Figura 15**

Kit de paneles solares



*Nota.* Imagen brindada por proveedor

Este sistema se caracteriza por su menor costo de inversión inicial, ya que no incorpora dispositivos de almacenamiento de energía. El funcionamiento del sistema depende directamente de la radiación solar disponible, por lo que la operación de la bomba se limita a los periodos de mayor incidencia solar.

**Opción 2.** La Opción 2 corresponde a un sistema de bombeo solar con almacenamiento de energía, integrado por una bomba fotovoltaica, paneles solares y un sistema de almacenamiento (baterías), que permite acumular energía para su uso posterior.

Este tipo de configuración posibilita una mayor flexibilidad operativa, ya que el sistema puede funcionar fuera de las horas solares pico, garantizando la continuidad del riego durante periodos de menor radiación solar.

## **Figura 16**

*Bomba solar DCPM21*



*Nota.* Imagen de la bomba brindada por proveedor

### **Figura 17**

Batería usada para almacenamiento



*Nota.* Imagen brindada por proveedor

**Opción 3.** La Opción 3 corresponde a un sistema de bombeo solar con almacenamiento de energía, similar a la Opción 2, cuya diferencia principal radica en el tipo de bomba utilizada. En este caso, el sistema emplea una bomba de riego eléctrica, la cual es adaptada mediante un variador de frecuencia para operar con energía proveniente de paneles solares.

El sistema está compuesto por paneles solares, un sistema de almacenamiento de energía y un variador de frecuencia, que permite regular el funcionamiento de la bomba eléctrica en función de la energía disponible, garantizando una operación estable y compatible con el suministro solar.

### **Figura 18**

*Bomba eléctrica GS-301T2*



*Nota.* Imagen de la bomba brindada por proveedor

### **3.3 Evaluación de viabilidad y sostenibilidad**

Luego de definir las alternativas de bombeo y los componentes asociados a cada una, se elaboró un listado completo de equipos y se realizó la cotización correspondiente. Con esta información se estimó el costo total de inversión inicial y los costos de mantenimiento de cada

opción. Estos valores se compararon con los costos de operación y mantenimiento del sistema de bombeo actualmente utilizado en la parcela, lo que permitió establecer una referencia clara para el análisis económico.

A partir de los costos obtenidos, se evaluó la viabilidad económica de las alternativas propuestas mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permitieron analizar la rentabilidad del sistema de bombeo fotovoltaico en el largo plazo, así como estimar el tiempo de recuperación de la inversión, considerando los ahorros generados por la reducción del uso de combustibles fósiles.

**Tabla 13**

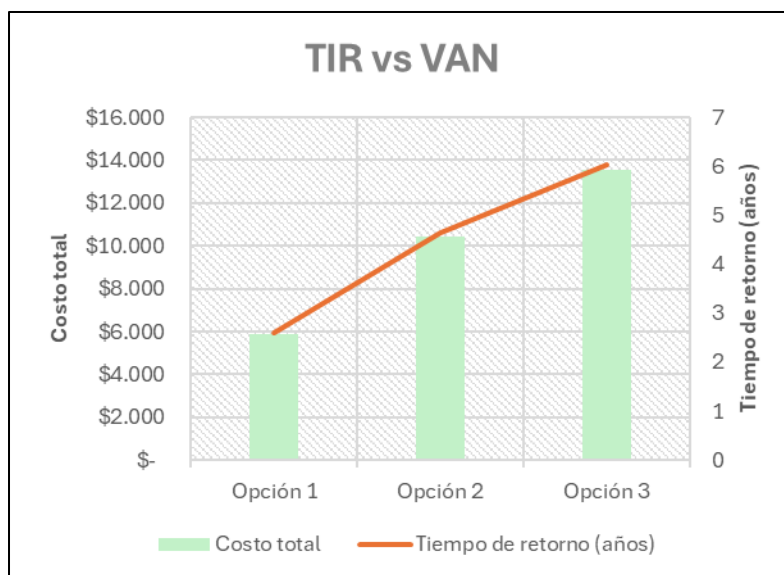
*Análisis VAN y TIR de opciones de bombeo*

Componentes de sistemas propuestos		Costo	Costo total	Costo anual (Bomba Diésel)	Tiempo de retorno (años)
Opción 1	Bomba ennos	\$ 4.303,69	\$ 5.854	\$ 2.249,75	3
	Kit de paneles	\$ 1.550,00			
Opción 2	Bomba Taifu	\$ 1.188,08	\$ 10.418		
	Kit de paneles	\$ 1.550,00			
	Banco de baterías	\$ 7.680,00			
Opción 3	Bomba Ksb Emporia	\$ 592,85	\$ 13.546		6
	Kit de paneles	\$ 3.100,00			
	Banco de baterías	\$ 7.680,00			
	Variador solar	\$ 2.173,50			

*Nota.* Tabla elaborada con costo brindado por proveedores

**Figura 19**

*Gráfico VAN vs TIR de opciones de bombeo*



*Nota.* Gráfico elaborado con costos calculados previamente

## Capítulo 4

### 4.1 Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1.1 Conclusiones

A partir del análisis técnico y energético realizado, se determinó que la Opción 1 no es viable para su implementación en el sistema de riego propuesto. Si bien presenta el menor costo de inversión, su funcionamiento se basa en un sistema de riego directo que requiere un tiempo de operación superior a las horas solares picos disponibles en la zona de estudio, lo que impide garantizar la continuidad y eficiencia del riego del cultivo.

En contraste, las Opciones 2 y 3 cumplen con los requerimientos técnicos establecidos en el diseño del sistema, ya que permiten cubrir adecuadamente la demanda hídrica del cultivo dentro de las condiciones climáticas y energéticas analizadas. Ambas alternativas aseguran el

funcionamiento del sistema de riego durante los periodos necesarios, incorporando soluciones que compensan la variabilidad de la radiación solar y garantizan una operación más estable y confiable.

#### **4.2.2 Recomendaciones**

Entre las opciones analizadas, la Opción 3 termina siendo la más funcional para la implementación del sistema de riego fotovoltaico. Si bien el monto de inversión inicial es más alto en comparación con las otras alternativas, durante la operación del sistema se evidencian ventajas importantes, sobre todo por la facilidad para conseguir la bomba y sus componentes en el mercado local. Esto hace más sencillo el reemplazo de repuestos, reduce el tiempo necesario para realizar mantenimientos y, con el uso continuo del sistema, contribuye a disminuir los costos asociados a estas labores.

De igual manera, se plantea la necesidad de mejorar la precisión en la estimación del caudal de riego requerido, complementando los cálculos teóricos con mediciones realizadas directamente en campo. La incorporación de tensiómetros para el seguimiento de la humedad del suelo, ubicados en puntos estratégicos del área de cultivo, permitiría ajustar de forma más adecuada la programación del riego y responder a las condiciones reales del suelo, favoreciendo un uso más eficiente del recurso hídrico y un mejor desempeño del sistema.

#### **Referencias**

Briceño, M., Álvarez, F., & Barahona, U. (2012). *Manual de riego y drenaje*.

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/096b9fb3-dbe4-470d-a3a3-ee0ecd2cd24c/content>

- Estrada, S., Diaz, J. (2006). *Fichas técnicas de los productos agrícolas aguacate, plátano, lechuga, maracuyá y papa*. <https://ciencia.lasalle.edu.co/bitstreams/c810bae3-6540-4673-ab5c-5f1b29cb8fb2/download>
- Fajardo, H. (2021). *La energía fotovoltaica en el riego agrícola: Revisión de literatura* (Tesis de doctorado, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2021). <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/7061/1/CPA-2021-T042.pdf>
- Fernandez, F., Pico, J., y Avellán, B. (2021). *Guía para la producción y manejo integrado del cultivo de plátano*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/items/717618c7-e3c5-47b5-b204-33fdefdd90ea>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). *Banana crop information*. FAO. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/banana/en/>
- Mera, D., & Quinteros, D. (2020). *Diseño de un sistema de riego inteligente por aspersión utilizando energía fotovoltaica para café y cacao en el centro experimental la playita de la universidad técnica de Cotopaxi*. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/b19affc1-cff2-4dc3-b494-2c52725bdb16>
- Pilataxi, C. (2025). *Boletín técnico: Módulo de información agroambiental y tecnificación 2024*. Gob.ec. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Modulo\\_Ambiental\\_ESPAC/2024/DOC\\_TEC\\_MOD\\_AMB\\_ESPAC\\_2024\\_04.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Modulo_Ambiental_ESPAC/2024/DOC_TEC_MOD_AMB_ESPAC_2024_04.pdf)
- Rogério, A., Brown, O., Mujica, A., Mata, C., y Osorio I. (2015). *Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542015000200002&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542015000200002&script=sci_arttext)

Salazar, L. (2025). *Diseño de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para el riego de plantaciones de banano en el cantón La Troncal provincia del Cañar* (Bachelor's thesis).

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30908>

Sandoval, J. & Muller, L. (1999). *Anatomía y morfología de la planta de banano (Musa AAA)*[*Anatomy and morphology of the banana plant (Musa AAA)*].

<https://www.musalit.org/seeMore.php?id=6554>

Simbaña, G., Cedeño, J., De la Torre, S., & Fonseca, R. (2024). *Sistema de Riego por Goteo para Invernaderos Utilizando Energía Fotovoltaica. Revista Ingeniería e Innovación del Futuro*, 3(2), 52-66. <https://editorialscientificfuture.com/index.php/riif/article/view/78/204>

Unión Española Fotovoltaica (2021). *Energía solar fotovoltaica. Oportunidad Para La Sostenibilidad—Informe Anual* UNEF.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39530857/energia\\_solar\\_fotovoltaica-libre.pdf?1446140714=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEnergia\\_Solar\\_Fotovoltaica.pdf&Expires=1764301497&Signature=V7KWY-ZwNSE4GbKITH8z2VnQ9EFY1FY3x~liaXawWSZujx362XQ5CZ5g6CRc2EPJYeSZHC0u9nshsCWyviJR3qp~KpQAC5Id2NSBBJE2ThSS3SA82TSNNxX-fV2L6A286tB-NCitike7eF1rZWtk2lgKOKbiYoserdXDj1p~oFPYPe8QXOvRyR1-xEmrmzzLnkTrBZwVgBjljNOuQKETtD70QHpmCsP8RGxS3A2Wifibd1hJhHKc6aN9NnCwZUvZ885GJUs0uNUnS2EGd5GDiapUKuUb2PsuO1XFEmdcRwhTt-j3B3OzAwy0QmFu~-leEaCZOW4tXV4yQxU0vlMPra\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39530857/energia_solar_fotovoltaica-libre.pdf?1446140714=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEnergia_Solar_Fotovoltaica.pdf&Expires=1764301497&Signature=V7KWY-ZwNSE4GbKITH8z2VnQ9EFY1FY3x~liaXawWSZujx362XQ5CZ5g6CRc2EPJYeSZHC0u9nshsCWyviJR3qp~KpQAC5Id2NSBBJE2ThSS3SA82TSNNxX-fV2L6A286tB-NCitike7eF1rZWtk2lgKOKbiYoserdXDj1p~oFPYPe8QXOvRyR1-xEmrmzzLnkTrBZwVgBjljNOuQKETtD70QHpmCsP8RGxS3A2Wifibd1hJhHKc6aN9NnCwZUvZ885GJUs0uNUnS2EGd5GDiapUKuUb2PsuO1XFEmdcRwhTt-j3B3OzAwy0QmFu~-leEaCZOW4tXV4yQxU0vlMPra__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

## Apéndice A

### 1. Primera visita a finca



*Nota.* Análisis visual de cultivo e instalación de equipos de medición

### 2. Toma de muestra de suelo



*Nota.* Usado posteriormente para determinación de textura y características adicionales de suelo

### 3. Instalación de instrumentos de medición



*Nota.* Instalación de cajete gravimétrico y anillos de infiltración

#### 4. Medición de infiltración



*Nota.* Medición realizada en 3 repeticiones

#### 5. Lectura de tensiómetros



*Nota.* Lectura realizada en un periodo de 4 días

## 6. Extracción y medición de suelo en cajete gravimétrico



*Nota.* Realizado de 0-20cm y 20-45cm de profundidad

## 7. Registro de mediciones en prueba de infiltración

1	2	3	4	5	6
Lectura en el cronómetro Hora, min, seg	Diferencia de tiempo min	Tiempo acumulado min	Lectura del nivel del agua mm	Infiltración mm	Tasa de infiltración mm/min
10:52 am	2	0	153		
10:54 am	2	2	151	2	
10:56 am	2	4	150	1	
10:58 am	2	6	150	0	
11:00 am	2	8	149	1	
11:02 am	2	10	149	2	
11:03 am	5	15	145	1	
11:08 am	5	20	144	1	
11:13 am	5	25	143	2	
11:22 am	5	30	141	1	
11:27 am	10	35	140	3	
11:33 am	10	45	139	2	
11:43 am	10	55	137	2	
11:53 am	15	65	133	3	
12:03 am	15	80	130	3	
12:13 am	20	95	123	4	
12:52 am	20	125	122		

1	2	3	4	5	6
Lectura en el cronómetro Hora, min, seg	Diferencia de tiempo min	Tiempo acumulado min	Lectura del nivel del agua mm	Infiltración mm	Tasa de infiltración mm/min
11:10 am	2	0	150		
11:12	2	2	144		
11:14	2	4	139		
11:16	2	6	130		
11:18	2	8	125		
11:20	5	10	116		
11:25	5	15	101		
11:30	5	20	87		
11:35	5	25	74		
11:40	5	30	61		
11:45	10	35	49		
11:55	10	45	32		
12:05	10	55	16		
12:15	15	65	1		
12:50	15	80	1		
1:45	30	75	3		
1:55	30	125	2		

1	2	3	4	5	6
Lectura en el cronómetro Hora, min, seg	Diferencia de tiempo min	Tiempo acumulado min	Lectura del nivel del agua mm	Infiltración mm	Tasa de infiltración mm/min
10:10 am		0	150		
10:20	2	2	149		
10:22	2	4	148		
10:24	2	6	147		
10:26	2	8	146		
10:28	2	10	145		
10:33	5	15	145		
10:38	5	20	144		
10:43	5	25	143		
10:48	5	30	141		
10:53	10	38	140		
11:03	10	48	138		
11:13	10	58	136		
11:23	15	63	134		
11:28	15	80	130		
11:53	15	98	127		
12:13	30	115	120		

**Nota.** 3 repeticiones en diferentes puntos

## 8. Mediciones en aspersores



*Nota.* 4 repeticiones de medición de presión y caudal