



E3. Desarrollo de tres diseños potenciales para el Sistema de Riego Solar (SPIS), en función de estructuras organizativas sociales, cultivos y potencial dentro de la cadena de valor

FOMENTO DE TECNOLOGÍAS DE RIEGO SOSTENIBLE:

Una perspectiva del nexo agua-energía-alimentos para la reducción del riesgo climático de pequeños agricultores en alto riesgo climático en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj en el corredor seco de Baja Verapaz, Guatemala.

Preparado para:



Fecha: 2 de Octubre, 2025

TTA Ref: CI-24-0029

Versión: 2

| | | | |
|--|---|-----------------------|-------------------------|
| Nombre del proyecto: | Fomento de tecnologías de riego sostenible: una perspectiva del nexo agua-energía-alimentos para la reducción del riesgo climático de pequeños agricultores en alto riesgo climático en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj en el corredor seco de Baja Verapaz, Guatemala. | | |
| Cliente: | CTCN, UNON | | |
| Consultor: | Trama TecnoAmbiental S.L. | | |
| Código de Proyecto: | UNEP/2024/482 TTA CI-24-0029 | | |
| E2: DIAGNÓSTICO DE PRÁCTICAS DE RIEGO Y COORDINACIÓN CON ORGANIZACIONES LOCALES | | | |
| Documentos Relacionados | Tipo de documento | Borrador/Final | Fecha de entrega |
| Plan de Trabajo Plan de Monitoreo y Declaración de Impacto Línea base del AFCIA Tracker | Word y Excel | Final | 9 de febrero, 2025 |
| E2. Diagnóstico de Prácticas de Riego y Coordinación con Organizaciones Locales | Word | Final | 16 de mayo, 2025 |
| | | | |
| | | | |
| Financiado por: | Este proyecto es financiado por el Fondo de Adaptación a través del Acelerador de Innovación Climática (AFCIA), implementado por el CTCN. | | |
| PRESENTACIÓN | | | |
| Este informe contiene el entregable No. 3 del proyecto <i>“Fomento de tecnologías de riego sostenible”</i> . La autora de este documento es Alma Cota de TTA | | | |

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN EJECUTIVO..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 1.1. Antecedentes..... | 2 |
| 1.2. Objetivo..... | 2 |
| 1.3. Estructura del informe..... | 2 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1. Recurso solar en Guatemala..... | 4 |
| 2.2. Datos climáticos..... | 6 |
| 2.3. Consideraciones sobre el cambio climático..... | 8 |
| 2.4. Determinación de la demanda de agua..... | 8 |
| 2.5. Bombeo solar fotovoltaico..... | 11 |
| 2.6. Distribución de agua en riego por goteo..... | 12 |
| 3. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA..... | 15 |
| 3.1. Condiciones productivas y sociales para el diseño del SPIS..... | 15 |
| 3.2. Condiciones de campo y desafíos de infraestructura para el diseño..... | 16 |
| 3.3. Estimación de la demanda por tipo de cultivo..... | 17 |
| 3.4. Condiciones y costos de perforación de pozos artesanales..... | 22 |
| 3.5. Sistemas de almacenamiento observados en campo..... | 22 |
| 4. CONFIGURACIONES DE LOS SPIS..... | 24 |
| 4.1. “Off-grid” SPIS con estanque intermedio y doble bombeo..... | 24 |
| 4.1.1. Evaluación de configuración: Uno o dos arreglos FV para alimentar las bombas solares CD..... | 25 |
| 4.1.2. Evaluación de configuración: Uno o dos arreglos FV para alimentar bombas de agua CA..... | 26 |
| 4.2. SPIS con tanque elevado y distribución por gravedad..... | 27 |
| 4.3. SPIS híbridos solar–red eléctrica..... | 29 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.3.1. | SPIS híbrido con estanque intermedio..... | 30 |
| 4.3.2. | SPIS híbrido con tanque elevado..... | 30 |
| 4.4. | Bombas para operación solar: consideraciones y criterios de selección | 31 |
| 4.5. | Soluciones de bombeo solar y energía para familias agricultoras fuera de la red..... | 32 |
| 4.5.1. | Configuración off-grid para bombeo de agua y SHS | 32 |
| 4.5.2. | Configuración on-grid para bombeo de agua y acceso a energía | 33 |
| 5. | Dimensionamiento del bombeo y arreglo FV | 36 |
| 5.1. | Evaluación de requerimientos para el diseño del sistema de bombeo | 36 |
| 5.1. | Configuración óptima para Rabinal y San Miguel Chicaj: SPIS híbrido con estanque intermedio y doble bombeo..... | 37 |
| 5.2. | Dimensionamiento de bombeo | 38 |
| 5.2.1. | Cálculo del caudal para riego eficiente de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz en temporada seca | 38 |
| 5.2.2. | Cálculo de la Carga Dinámica Total (CDT) | 38 |
| 5.3. | Herramienta metodológica: <i>SPIS Toolbox</i> | 40 |
| 5.4. | Cuatro diseños FV para el riego de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz | 41 |
| 5.4.1. | Etapa 1: Diseños FV para la extracción de agua subterránea y dirigirla al estanque intermedio | 41 |
| 5.4.2. | Etapa 2: Diseños FV para llevar agua desde el estanque al cultivo con riego por goteo | 47 |
| 5.5. | Cuatro diseños FV para el riego de 0.7 ha (1 mz) de maíz | 52 |
| 5.5.1. | Etapa 1: Diseños FV para la extracción de agua subterránea y dirigirla al estanque intermedio | 52 |
| 5.5.2. | Etapa 2: Diseños FV para llevar agua desde el estanque al cultivo con riego por goteo | 55 |
| 5.6. | DISEÑOS INTEGRADOS..... | 59 |
| 5.7. | Dimensionamiento de SHS..... | 61 |
| 5.8. | Alcance del diseño y flexibilidad tecnológica..... | 62 |
| 6. | CONCLUSIONES | 64 |

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de irradiación solar promedio anual en Guatemala, obtenido del Global Solar Atlas. A la derecha se resumen los principales indicadores solares para sistemas fotovoltaicos instalados con inclinación óptima. | 4 |
| Figura 2. Comportamiento horario de la irradiación normal directa (DNI) en el departamento de Baja Verapaz por mes. Gráfica generada de datos correspondientes al departamento de Baja Verapaz extraídos de <i>Global Solar Atlas</i> | 5 |
| Figura 3. Influencia del método de riego sobre el volumen de agua requerido. | 9 |
| Figura 4. Off-Grid SPIS con estanque intermedio y doble bombeo. | 25 |
| Figura 5. SPIS con tanque elevado y riego por gravedad. | 28 |
| Figura 6. SPIS híbrido solar–red con estanque intermedio. | 30 |
| Figura 7. SPIS híbrido solar–red con tanque elevado. | 31 |
| Figura 8. Solución de bombeo de agua y acceso a energía para pequeños agricultores fuera de la red. | 33 |
| Figura 9. Solución de bombeo de agua y acceso a energía para pequeños agricultores conectados a una red eléctrica inestable y costosa | 35 |
| Figura 10. Paquetes de energía para el dimensionamiento de SHS. | 62 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Temperaturas máximas y mínimas promedio por mes en Rabinal y San Miguel Chicaj. | 6 |
| Tabla 2. Parámetros climáticos y resultados del cálculo de ETo para Rabinal y San Miguel Chicaj. | 10 |
| Tabla 3. Demanda de agua por cultivo, por etapa fenológica, considerando un 10% del efecto del cambio climático en la evapotranspiración. | 20 |
| Tabla 4. Demanda de agua por cultivo, por etapa fenológica, considerando un 15% del efecto del cambio climático en la evapotranspiración. | 21 |
| Tabla 5. Estimación de días y costos para la perforación de pozos artesanales según profundidad y tipo de suelo | 22 |
| Tabla 6. Dimensiones de sistemas de almacenamiento de agua observados en campo. | 23 |
| Tabla 7. Comparación técnica de configuraciones de alimentación para bombas DC. | 26 |
| Tabla 8. Comparación técnica de configuraciones de alimentación para bombas CA. | 27 |
| Tabla 9. Alturas mínimas de tanque elevados según tipo de emisor. | 29 |
| Tabla 10. Matriz de diseños de bombeo solar para riego de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz. | 60 |
| Tabla 11. Matriz de diseños de bombeo solar para riego de 0.7 ha (1 mz) de maíz. | 60 |
| Tabla 12. Cuatro diseños de bombeo solar para riego de maíz en temporada seca. | 61 |

| ABREVIACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|--------------------|---|
| AFCIA | Acelerador de Innovación Climática, mencionado como financiador del proyecto |
| BID | Banco Interamericano de Desarrollo |
| CADER | Centros de Aprendizaje para el Desarrollo Rural |
| CATIE | Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza |
| CDT | Carga Dinámica Total |
| CTCN | Centro y Red de Tecnología Climática - <i>Climate Technology Centre and Network</i> |
| CunBAV | Centro Universitario de Baja Verapaz |
| DAR | Técnico de Desarrollo Agropecuario Rural |
| END | Entidad Nacional Designada |
| FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Food |
| FV | Fotovoltaico |
| GIZ | Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional - <i>Deutsche Gesellschaft für</i> |
| HP | Caballos de Fuerza - <i>Horsepower</i> |
| MARN | Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales |
| MAGA | Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación |
| PSH | Hora Solar Pico (Peak Sun Hours) |
| SPIS | Sistemas de Riego Solar- <i>Solar Photovoltaic Irrigation Systems</i> |
| SPIS Toolbox | Herramienta metodológica para el diseño de sistemas de riego solar |
| TTA | Trama TecnoAmbiental S.L. |

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta el diseño de Sistemas de Riego Solar (SPIS) para las necesidades de los pequeños productores en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, en el corredor seco de Baja Verapaz, Guatemala. El proyecto busca mejorar la seguridad de agua y alimentaria de los agricultores mediante soluciones sostenibles frente a los desafíos del cambio climático. La región enfrenta condiciones climáticas adversas, como sequías prolongadas y lluvias irregulares, que limitan la productividad agrícola. Los pequeños agricultores enfrentan limitaciones en el acceso al agua, pues dependen de pozos artesanales de baja recarga y de sistemas de almacenamiento insuficientes; además, el suministro eléctrico disponible es costoso e inestable. Estas condiciones refuerzan la necesidad de tecnologías innovadoras como los SPIS, que aprovechan el alto potencial solar de la región.

Se desarrollaron 16 dimensionamientos de SPIS, adaptados a diferentes escenarios de carga dinámica total (CDT) y caudales. Finalmente, se seleccionaron 4 dimensionamientos, que incluyen opciones para riego de 0.35 y 0.7 ha (0.5 y 1 mz) de cultivo, con diferentes combinaciones de CDT y caudales. Las configuraciones revisadas incluyen:

- Estanques intermedios y doble bombeo.
- Sistemas con tanques elevados y distribución por gravedad.
- Sistemas híbridos solar–red eléctrica, que garantizan la continuidad del riego en condiciones de baja irradiación o cortes eléctricos.

Además, se propusieron Sistemas Solares Domiciliarios (SHS, por sus siglas en inglés) para viviendas rurales fuera de la red, diseñados para aprovechar la energía excedente del arreglo fotovoltaico cuando la bomba no está en operación. Estos SHS ofrecen acceso a electricidad confiable para cubrir necesidades básicas como iluminación, refrigeración y uso de electrodomésticos, mejorando la calidad de vida de las familias agricultoras.

El informe recomienda profundizar los pozos artesanales, fortalecer la infraestructura de almacenamiento de agua, capacitar a los agricultores en el manejo de sistemas fotovoltaicos y establecer mecanismos de financiamiento rural. La implementación de los SPIS y SHS tiene el potencial de transformar la agricultura y la calidad de vida en el corredor seco, permitiendo a los pequeños productores superar las limitaciones climáticas y técnicas. Al garantizar un suministro hídrico y energético confiable y sostenible, estos sistemas contribuirán a mejorar la productividad agrícola, generar ingresos estables y fortalecer la seguridad alimentaria en la región.

Este proyecto establece una base técnica y operativa para la implementación de SPIS, ofreciendo soluciones adaptadas a las necesidades de los agricultores y promoviendo un modelo replicable en otras regiones rurales de Guatemala.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El objetivo principal de esta asistencia técnica es fomentar la implementación y adopción sostenible de sistemas de riego solar (*Solar-Powered Irrigation Systems*, SPIS por sus siglas en inglés) para agricultores a pequeña escala en Guatemala, mediante un enfoque integral que aborde las dimensiones técnicas, sociales y económicas de manera articulada y sostenible.

Este proyecto tiene como meta aumentar la capacidad adaptativa y la resiliencia del sector agrícola en la región de Baja Verapaz, un área críticamente afectada por los efectos del cambio climático. Al mismo tiempo, busca abordar los desafíos interconectados del nexo agua-energía-alimentos, promoviendo prácticas de riego sostenibles mediante tecnologías innovadoras como los SPIS.

En la etapa previa de esta asistencia técnica, se llevó a cabo un estudio exhaustivo sobre las prácticas de riego en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj. Este análisis se fundamentó en investigaciones de campo y en un proceso participativo que involucró a una amplia variedad de actores locales, incluyendo agricultores, representantes comunitarios, instituciones académicas, entidades gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil, agencias de cooperación internacional y el sector privado. Como resultado de esta articulación interinstitucional, se desarrolló un modelo de negocio orientado a facilitar la adopción sostenible de tecnologías de riego solar, integrando consideraciones técnicas, sociales y económicas clave para su implementación y escalabilidad.

Este documento brinda continuidad a ese proceso mediante el desarrollo de diseños representativos de sistemas de riego solar. Los diseños responden a distintas realidades productivas, estructuras organizativas y técnicas identificadas en campo, y tienen como finalidad servir como modelos de referencia replicables y adaptables para pequeños agricultores que enfrentan condiciones similares en el corredor seco de Baja Verapaz y otras regiones rurales del país.

1.2. Objetivo

Presentar el diseño de tres (3) sistemas de riego solar (SPIS) desarrollados como parte del proceso de asistencia técnica orientado a promover soluciones sostenibles para pequeños agricultores en la región de Baja Verapaz, Guatemala.

1.3. Estructura del informe

Este informe se organiza en siete capítulos que desarrollan paso a paso los aspectos técnicos y de diseño de sistemas fotovoltaicos para sistemas de riego solar (SPIS), considerando el contexto climático, la demanda hídrica y las posibles configuraciones.

- El Capítulo 1 introduce el contexto, los objetivos del trabajo y explica cómo está estructurado el documento.
- El Capítulo 2 presenta el marco teórico, incluyendo información sobre el recurso solar, el clima, el bombeo solar y la distribución de agua, además de criterios técnicos clave para el diseño.

- El Capítulo 3 describe las condiciones generales y de campo, la estimación de la demanda de agua, los costos, y los sistemas actualmente disponibles.
- El Capítulo 4 muestra diferentes configuraciones de SPIS: con estanque, con tanque y sistemas híbridos solar–red. Cada una se analiza por separado.
- El Capítulo 5 aborda el dimensionamiento de los sistemas. Incluye el cálculo de caudal, carga, simulaciones, y la presentación de los diseños FV desarrollados en dos etapas.
- El Capítulo 6 presenta las conclusiones del análisis integral, destacando la importancia de los SPIS en Baja Verapaz, el diagnóstico de necesidades locales, las configuraciones técnicas propuestas, los beneficios esperados y las recomendaciones para su implementación.

2. MARCO TEÓRICO

El diseño de un SPIS requiere la integración de varios elementos técnicos y climáticos. Este capítulo aborda los fundamentos clave que sustentan el diseño: el potencial solar de Guatemala como base energética, la determinación de la demanda de agua, los principios del bombeo fotovoltaico, y el uso eficiente del recurso en campo mediante sistemas de riego adecuados.

2.1. Recurso solar en Guatemala

Guatemala posee un alto potencial de generación solar a nivel nacional, lo que convierte a la energía fotovoltaica en una solución particularmente atractiva para zonas rurales sin acceso o sin acceso confiable a la red eléctrica. Esta disponibilidad energética resulta clave para aplicaciones agrícolas como el riego.

El país cuenta con niveles promedio diarios de irradiación solar global horizontal (o insolación diaria) que oscilan entre 4.19 y 6.10 kWh/m²/día, según estimaciones del *Global Solar Atlas*.¹ En el departamento de Baja Verapaz, las condiciones son favorables para el aprovechamiento de la energía solar, con un promedio anual de 5.24 kWh/m²/día.

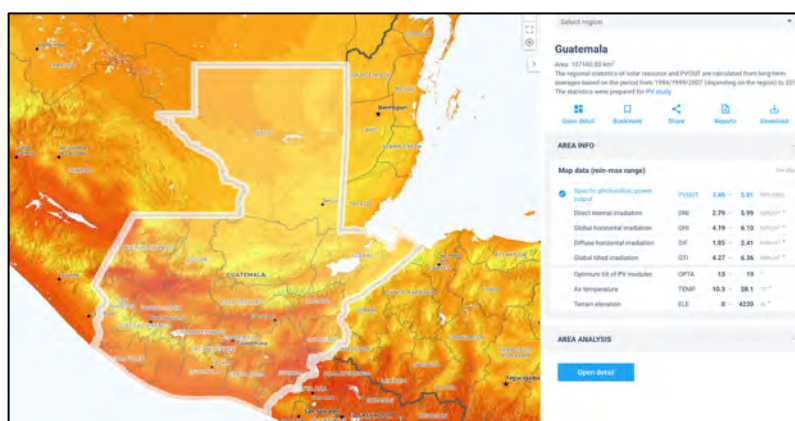


Figura 1. Mapa de irradiación solar promedio anual en Guatemala, obtenido del Global Solar Atlas. A la derecha se resumen los principales indicadores solares para sistemas fotovoltaicos instalados con inclinación óptima.

Al instalar colectores solares con una inclinación fija de 15°, se optimiza la captación de radiación solar, elevando la irradiación promedio anual a aproximadamente 5.3 kWh/m²/día, lo que mejora el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos durante todo el año. Además, es posible ajustar la inclinación de los paneles al ángulo más favorable para los meses de mayor demanda, lo que permite

¹ <https://globalsolaratlas.info/map?c=15.786968,-90.233459,8&r=GTM>. Desarrollado por ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program), en colaboración con Solargis, y publicado por el World Bank Group. Consulta: julio de 2025.

maximizar la generación justo cuando el consumo energético es más alto, como suele ocurrir en temporada seca en aplicaciones agrícolas.

La Figura 2 presenta la irradiación normal directa (DNI) por hora del día, desglosada por mes para los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, en el departamento de Baja Verapaz. Esta información permite identificar los meses con mayor disponibilidad del recurso. Esto resulta clave para aplicaciones de riego, donde existe una coincidencia natural entre la temporada de mayor demanda de agua para riego (época seca) y los niveles más altos de radiación directa, lo cual favorece una operación más eficiente y confiable de los sistemas solares.

La gráfica muestra un aumento significativo de la irradiación entre los meses de febrero y abril, coincidiendo con la temporada seca, cuando la demanda de agua para riego es más elevada.

Los SPIS están diseñados específicamente para satisfacer la demanda durante los meses de febrero a abril, aprovechando la sincronía natural entre recurso solar y la mayor demanda de agua.

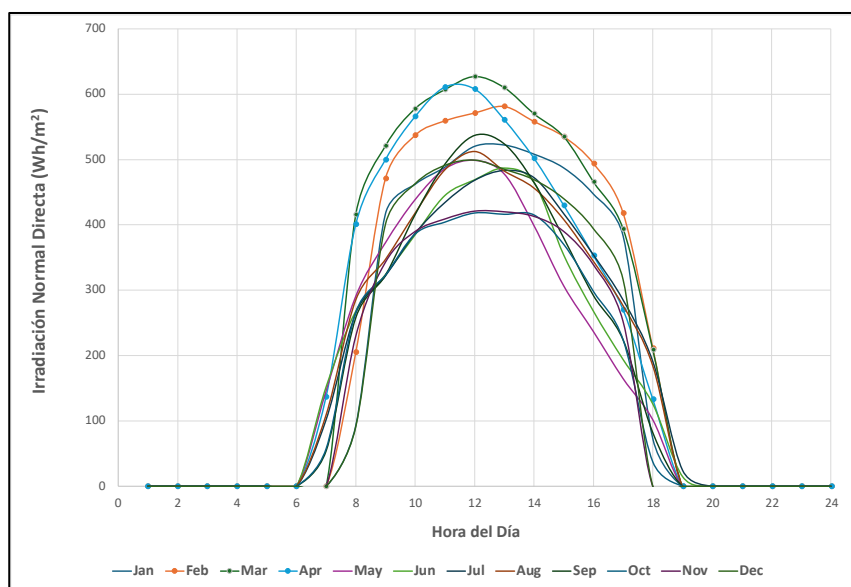


Figura 2. Comportamiento horario de la irradiación normal directa (DNI) en el departamento de Baja Verapaz por mes. Gráfica generada de datos correspondientes al departamento de Baja Verapaz extraídos de *Global Solar Atlas*.²

² <https://globalsolaratlas.info/detail?c=14.88905,-90.784149,9&r=GTM&s=15.11708,-90.410962&m=site>

Definiciones clave

Irradiación Global Horizontal (GHI): es la cantidad total de energía solar que incide sobre una superficie horizontal por unidad de área durante un periodo de tiempo determinado. Incluye tanto la radiación directa del sol como la radiación difusa del cielo.

Irradiación solar: Es la cantidad total de energía solar que incide sobre una superficie en un período determinado, normalmente expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día). Este valor permite estimar cuánta energía solar está disponible en una localidad específica para fines energéticos.

Irradiancia: Es la potencia instantánea de la radiación solar que llega a una superficie, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m²). Se refiere al flujo de energía solar en un momento dado, y varía a lo largo del día según la posición del sol y las condiciones atmosféricas.

Hora Solar Pico (HSP): Unidad que representa la cantidad de energía solar recibida durante un día como si la irradiancia fuera constante a 1.000 W/m². Por ejemplo, una irradiación de 5.5 kWh/m²/día equivale a 5.5 HSP. Este parámetro es clave para dimensionar sistemas fotovoltaicos con base en la disponibilidad real de energía solar en un lugar determinado.

Insolación diaria: Es la irradiación solar global horizontal diaria, es decir, la cantidad total de energía solar que incide sobre una superficie horizontal durante un día, y se mide en kWh/m²/día.

Irradiación Normal Directa (DNI): Es la cantidad de energía solar que llega en línea recta desde el sol a una superficie perpendicular a los rayos solares, sin incluir la radiación difusa del cielo ni la reflejada por el suelo u otros objetos. Se expresa comúnmente en kWh/m²/día.

2.2. Datos climáticos

El comportamiento climático de los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj³ condiciona directamente tanto la demanda de agua para riego como la viabilidad técnica del aprovechamiento solar para operar sistemas de bombeo. A continuación, se resumen los principales parámetros climáticos de la región, con base en datos representativos para la ubicación 15.13° N, 90.52° O entre los dos municipios.

Las temperaturas en la región son moderadas durante todo el año, con máximas promedio que varían entre 21.2 °C en enero y 27.8 °C en marzo y abril, y mínimas entre 12.5 °C y 17.6 °C. Estas condiciones permiten una producción agrícola diversificada a lo largo del año.

Tabla 1. Temperaturas máximas y mínimas promedio por mes en Rabinal y San Miguel Chicaj.

| Mes | Temp. máxima | Temp. mínima |
|-----|--------------|--------------|
| Ene | 21.2 | 12.5 |
| Feb | 24.0* | 15.0* |

³ https://www.weather-atlas.com/en/guatemala/rabinal-climate?utm_source=chatgpt.com

| Mes | Temp. máxima | Temp. mínima |
|---------|--------------|--------------|
| Mar | 27.8* | 16.5* |
| Abr | 27.8 | 16.5 |
| May | 27.0* | 17.0* |
| Jun | 26.0* | 17.6* |
| Jul-Dic | ~26-24 max | ~17-13 min |

* Estimaciones intermedias basadas en rangos climáticos promedio mensuales disponibles.

Cabe señalar que, aunque las temperaturas promedio registradas en abril rondan los 27.8 °C, durante las visitas de campo se observaron condiciones considerablemente más calurosas. Esto se debe a la alta radiación solar y a la acumulación de calor en zonas sin cobertura vegetal, lo cual incrementa la temperatura superficial y la sensación térmica. Estas condiciones intensifican la evapotranspiración del cultivo y refuerzan la necesidad de contar con sistemas de riego eficientes durante esta época.

Precipitación

El régimen de lluvias en la región es marcadamente estacional. La precipitación anual alcanza aproximadamente 2,530 mm, concentrados entre mayo y octubre, mientras que la época seca se extiende de diciembre a marzo.

- Febrero, el mes más seco, registra cerca de 71 mm, lo que representa un volumen bajo para la agricultura. Aunque pueden existir algunos días con lloviznas o precipitaciones ligeras, estas no son suficientes para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo ni para recargar fuentes de agua de forma efectiva.
- En abril, la transición hacia la temporada de lluvias se manifiesta con ~143 mm,
- En julio se alcanzan picos de ~405 mm de precipitación con niveles de humedad superiores al 85%.

Esta estacionalidad marca con claridad los meses en los que los SPIS serán más necesarios y deberán operar con mayor intensidad.

Humedad relativa y viento

- La humedad relativa varía entre 76% en abril, uno de los meses más secos, y hasta 91 % en noviembre, coincidiendo con la fase final de la temporada lluviosa.
- La velocidad del viento desciende gradualmente de ~9 km/h en marzo a 6 km/h en mayo, lo que modera la evapotranspiración atmosférica.

Percepción de sequía

A pesar de que los registros climáticos muestran cierta precipitación durante los primeros meses del año, los agricultores enfrentan una marcada escasez de agua en ese periodo. La baja intensidad y distribución irregular de las lluvias, sumadas a una alta evaporación y a la falta de recarga hídrica efectiva de pozos, ríos o reservorios, generan condiciones que son percibidas como sequía. Esta situación se agrava en etapas críticas del desarrollo del cultivo, cuando la demanda de agua es mayor y el suministro natural no es suficiente.

La implementación de SPIS durante estos meses se presenta, por tanto, como una estrategia clave de adaptación, permitiendo a los pequeños productores asegurar el suministro hídrico en momentos de mayor vulnerabilidad climática.

2.3. Consideraciones sobre el cambio climático

Es importante señalar que los datos climáticos utilizados corresponden a promedios históricos multianuales, generalmente calculados sobre series de al menos 30 años. Sin embargo, el cambio climático ha comenzado a modificar estos patrones, afectando tanto la distribución temporal de las lluvias como la intensidad de eventos extremos. En la región del departamento de Baja Verapaz, los agricultores han reportado sequías más prolongadas, lluvias irregulares y una creciente imprevisibilidad del calendario agrícola, lo cual coincide con tendencias observadas a nivel nacional.

Esta situación subraya la necesidad urgente de contar con datos climáticos localizados y actualizados, que permitan una estimación más precisa de variables clave para determinar la demanda de agua de los cultivos. Una mejor caracterización del clima local también facilitaría el ajuste de los calendarios agrícolas y la anticipación de escenarios de riesgo hídrico.

En este sentido, la participación de instituciones como el **Centro Universitario de Baja Verapaz (CUNBAV)**, que realiza investigaciones y mediciones de campo en la región, y de organizaciones como **SINTROP.IA**, desarrolladora de un sistema multimodal de sensores bio-ambientales de alta calidad, precisión y bajo costo, podría ser clave para establecer redes locales de monitoreo, procesamiento y transmisión de información climática útil, oportuna y adaptada al territorio. Esta información tendría un alto potencial de aplicación por parte de instituciones como el **MAGA** y el **MARN**, en beneficio de los pequeños productores.

Además, el desafío climático actual refuerza la necesidad de incorporar enfoques de diseño adaptativo en las soluciones técnicas. En particular, los sistemas de bombeo solar para riego (SPIS) representan una herramienta estratégica para fortalecer la resiliencia agrícola, al permitir un manejo más flexible y autónomo del agua durante periodos críticos, incluso ante escenarios de mayor variabilidad climática.

2.4. Determinación de la demanda de agua

El cálculo de la demanda de agua es la base para dimensionar correctamente un sistema SPIS. Este valor define cuánta agua debe ser bombeada por día para satisfacer las necesidades del cultivo, evitando tanto el sobredimensionamiento del sistema como la insuficiencia del riego. Los factores que influyen en la determinación de la demanda son:

- **Parámetros climáticos:** El clima local es el principal determinante de la evapotranspiración, proceso que representa la pérdida de agua por evaporación desde el suelo y transpiración de las plantas. Los factores más relevantes son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Estos parámetros definen el poder evaporativo de la atmósfera, expresado mediante la *evapotranspiración de referencia (ET_o)*.

- **Tipo de cultivo y etapa de desarrollo:** Cada especie vegetal tiene requerimientos hídricos específicos, que varían según su etapa fenológica. Aspectos como la altura del cultivo, la cobertura foliar, la reflectancia, la rugosidad y el desarrollo radicular influyen en la evapotranspiración del cultivo (ETc), la cual se define como la cantidad de agua que un cultivo transpira y que se evapora del suelo que lo rodea, bajo condiciones óptimas de manejo, sin limitaciones de agua ni nutrientes, y en un campo lo suficientemente grande como para representar condiciones uniformes. La ETc representa, por tanto, la demanda hídrica potencial del cultivo en condiciones estándar, ajustada a sus características fisiológicas y al clima local.
- **Área cultivada:** La superficie total bajo riego condiciona el volumen de agua requerido. Una mayor área implica una mayor demanda hídrica total.
- **Tipo de suelo:** Las características físicas del suelo (textura, estructura, profundidad) afectan su capacidad de retención de humedad, la infiltración y la disponibilidad de agua para las raíces.
- **Tipo de sistema de riego:** La eficiencia del método de riego utilizado (por goteo ~90 %, aspersión ~70–75 %, surcos ~50–60 %, etc.) influye directamente en el volumen real de agua que debe ser suministrado. A menor eficiencia, mayor será la demanda de agua requerida para compensar pérdidas por escurrimiento, evaporación o distribución desigual. Esta eficiencia debe ser considerada para ajustar la demanda neta (ETc) y dimensionar adecuadamente el sistema de bombeo solar.

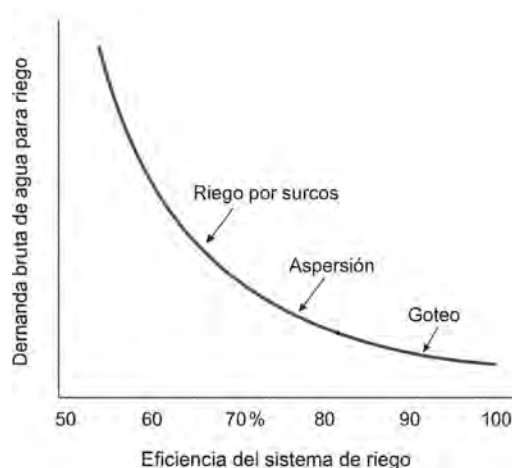


Figura 3. Influencia del método de riego sobre el volumen de agua requerido.

Los SPIS están diseñados para atender demandas de agua mediante riego por goteo, los cuales ofrecen una eficiencia estimada de 90%. Esta tecnología optimiza el recurso hídrico y es técnicamente compatible con sistemas fotovoltaicos de pequeña escala.

El método utilizado para estimar la demanda hídrica de los cultivos se basa en la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Donde:

- ETC = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).
1 mm de lámina de agua equivale a 1 L/ m²
1 hectárea (ha) = 10,000 m³
Entonces, 1 mm de agua sobre 1 ha = 10,000 L = 10 m³
- Kc = Coeficiente del cultivo, determinado según su etapa de desarrollo (según FAO-56⁴ u otras fuentes especializadas)
- ETo = Evapotranspiración de referencia (mm/día), estimada a partir de datos climáticos locales.

Para este estudio, la ETo se calculó utilizando la ecuación de Penman–Monteith recomendada por la FAO, que integra variables climáticas⁵ como la temperatura media, la humedad relativa, la radiación solar (GHI)⁶ y la velocidad del viento. La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para cada mes del año, utilizando datos representativos de la región de Rabinal y San Miguel Chicaj. Adicionalmente, **se incluye la ETo ajustada en un 10% y 15%, como medida preventiva ante los efectos del cambio climático, los cuales se han intensificado en la última década.** Este ajuste considera un aumento en la demanda evaporativa debido a condiciones climáticas más extremas, como temperaturas más elevadas, menor humedad relativa y mayor radiación solar. Incluir ETo ajustadas permite dimensionar los sistemas de riego con criterios de mayor resiliencia, anticipando escenarios más exigentes en cuanto a la disponibilidad y uso del agua.

Tabla 2. Parámetros climáticos y resultados del cálculo de ETo para Rabinal y San Miguel Chicaj.

| Mes | T (°C) | HR (%) | GHI (kWh/m ² /d) | v (m/s) | ETo (mm/d) | ETo ajustada +10% (mm/d) | ETo ajustada +15% (mm/d) |
|-----|--------|--------|-----------------------------|---------|------------|--------------------------|--------------------------|
| Ene | 16.85 | 85 | 5 | 2.2 | 2.34 | 2.57 | 2.69 |
| Feb | 19.5 | 80 | 6 | 2.5 | 2.88 | 3.17 | 3.31 |
| Mar | 22.15 | 78 | 6.2 | 2.8 | 3.38 | 3.72 | 3.89 |
| Abr | 22.15 | 76 | 6.1 | 2.8 | 3.51 | 3.86 | 4.04 |
| May | 22 | 78 | 5.5 | 2.6 | 3.17 | 3.49 | 3.65 |
| Jun | 21.8 | 85 | 5 | 2.4 | 2.64 | 2.90 | 3.03 |
| Jul | 25 | 88 | 4.8 | 2.2 | 2.68 | 2.95 | 3.09 |
| Ago | 25 | 90 | 4.7 | 2.1 | 2.65 | 2.92 | 3.05 |
| Sep | 25 | 89 | 4.8 | 2.1 | 2.67 | 2.94 | 3.07 |
| Oct | 25 | 88 | 5 | 2.2 | 2.75 | 3.03 | 3.16 |
| Nov | 21 | 91 | 5.2 | 2.3 | 2.75 | 3.03 | 3.17 |
| Dic | 21 | 90 | 5.3 | 2.3 | 2.73 | 3.00 | 3.14 |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos locales y aplicación de la ecuación FAO-56.

⁴ Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma. Disponible en línea <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>

⁵ https://www.weather-atlas.com/en/guatemala/rabinal-climate?utm_source=chatgpt.com

⁶ <https://globalsolaratlas.info/detail?c=14.88905,-90.784149,9&r=GTM&s=15.11708,-90.410962&m=site>

La demanda neta de agua se obtiene multiplicando la ET_c por el área cultivada, y convirtiendo los milímetros en metros cúbicos por día. Para estimar el volumen real de agua que debe ser suministrado por el sistema de bombeo, se debe considerar la eficiencia del sistema de riego. Esto permite calcular la demanda de agua mediante la siguiente expresión:

Ecuación 2

$$\text{Demanda de Agua} = \frac{ET_c \times \text{Area del Cultivo}}{E_f}$$

Donde:

- E_f es la eficiencia del método de riego.

Este ajuste es fundamental para dimensionar correctamente el sistema SPIS, asegurando que se suministre el volumen de agua necesario para compensar las pérdidas asociadas al tipo de riego utilizado.

2.5. Bombeo solar fotovoltaico

El bombeo solar fotovoltaico constituye una solución energética eficiente, autónoma y sostenible para el suministro de agua en zonas rurales. Su aplicación es especialmente adecuada en sistemas de riego, donde existe una alta correlación entre la disponibilidad de radiación solar y la demanda hídrica durante la temporada seca.

Principio de funcionamiento

El sistema convierte la energía solar en electricidad mediante módulos fotovoltaicos, la cual alimenta una bomba hidráulica encargada de extraer o impulsar agua desde una fuente (como un pozo, río, estanque o reservorio) hasta el punto de uso o almacenamiento. Existen dos esquemas de operación: el sistema puede ser de operación directa o combinarse con almacenamiento de agua en tanques, permitiendo el uso del recurso fuera del horario solar.

Tipos de bombas solares

Según el tipo de fuente hídrica y la profundidad de extracción, se emplean principalmente dos tecnologías:

- Bombas sumergibles: Se instalan dentro del pozo, por debajo del nivel freático. Son apropiadas para extracciones de mediana a gran profundidad, y permiten elevar agua con eficiencia a lo largo de una carga dinámica total.
- Bombas de superficie: Se colocan fuera de la fuente de agua, por encima del nivel del líquido. Son adecuadas para fuentes superficiales (ríos, lagunas o estanques).

Carga Dinámica Total (CDT)

La CDT representa la suma de todas las resistencias verticales y horizontales que la bomba debe superar para transportar el agua desde la fuente hasta el punto de entrega o almacenamiento. Es un parámetro esencial en el dimensionamiento de sistemas de bombeo solar, ya que determina la energía que deberá proporcionar la bomba y, por tanto, la potencia requerida y el tamaño del sistema fotovoltaico.

Componentes principales

Un sistema SPIS típico está conformado por:

- **Arreglo fotovoltaico:** Captan la irradiación solar y generan electricidad en corriente directa.
- **Bomba hidráulica:** Motor eléctrico (AC o DC) acoplado al sistema de impulsión.
- **Controlador o inversor:** Regula el funcionamiento de la bomba, adapta la energía disponible, y protege el sistema contra sobrecargas o bajas tensiones.
- **Sistema de almacenamiento de agua:** Tanques elevados para riego por gravedad o reservorios a nivel del suelo.
- **Estructura de soporte y cableado:** Garantizan la instalación segura y eficiente de los paneles y la conexión eléctrica.
- **Sistema de riego:** Red de distribución y aplicación del agua (riego por goteo, aspersión, etc.), que define la eficiencia del uso del agua y condiciona el caudal, la presión y el tiempo de operación requerido.

2.6. Distribución de agua en riego por goteo

El riego por goteo es una técnica que suministra agua directamente a la zona radicular activa de las plantas, mediante la aplicación localizada y de bajo caudal a través de emisores o goteros. Al aplicar el agua lentamente mediante emisores o cintillas, se forma un bulbo húmedo que rodea la raíz, adaptándose a la textura del suelo. En suelos ligeros (arenosos), el bulbo tiende a ser más profundo y angosto; en suelos pesados (arcillosos), es más ancho y superficial. Esta modalidad busca optimizar el uso del recurso hídrico, al reducir las pérdidas por evaporación, escorrentía y percolación profunda.

El diseño del sistema de riego por goteo debe garantizar que el bulbo húmedo generado por cada gotero abarque la zona radicular efectiva. Para lograrlo, se deben considerar los siguientes principios:

- **Ubicación de los goteros:** Generalmente, se recomienda colocar una línea de goteo por hilera de cultivo, con goteros ubicados cerca de la base de las plantas. En algunos casos puede utilizarse una sola línea para dos hileras cuando las plantas tienen raíces más superficiales o si se emplean goteros de mayor alcance lateral.
- **Espaciamiento de goteros:** Se define según el patrón de enraizamiento y la textura del suelo. En suelos ligeros (arenosos), donde el agua se infiltra más en profundidad que en lateralidad, se requieren goteros más cercanos (20–30 cm). En suelos más pesados (arcillosos), con mayor difusión lateral, el espaciamiento puede ampliarse (hasta 40–50 cm).

- **Profundidad de humedecimiento:** El sistema debe aplicar la lámina de riego necesaria para alcanzar una profundidad efectiva de 25 a 40 cm por evento de riego, que es donde se concentra más del 70 % del sistema radicular activo del maíz.
- **Número y duración de los riegos:** En lugar de pocos riegos con altos volúmenes, el riego por goteo permite realizar aplicaciones frecuentes con volúmenes menores, manteniendo la zona radicular constantemente húmeda, lo cual favorece la absorción de nutrientes y reduce el estrés hídrico.

Este patrón de humedecimiento localizado no solo mejora la eficiencia del uso del agua, sino que también permite un control más preciso de la humedad del suelo y del crecimiento del cultivo. Para un sistema bien diseñado, es fundamental que la distribución de las líneas de riego, el tipo de goteros y su espaciamiento estén alineados con la fisiología del cultivo, las características del suelo y la topografía del terreno.

Componentes típicos de sistemas de riego por goteo

- Línea principal: transporta el agua desde la bomba o tanque hasta el área de riego.
- Líneas laterales: distribuyen el agua hacia las hileras del cultivo.
- Emisores (en sistemas óptimos): dispositivos que regulan y dosifican el agua con precisión, como goteros, microaspersores o emisores autocompensantes, instalados en líneas de riego más duraderas. Se utilizan en sistemas permanentes o de alta eficiencia.
- Cintillas de riego: mangueras delgadas y económicas, con emisores integrados o perforaciones simples, conectadas a las líneas laterales. Se colocan sobre los surcos del cultivo y se instalan mediante conectores rápidos.

Uso de cintillas económicas desechables

Durante el trabajo de campo se constató el uso de cintillas económicas. Estas distribuyen el agua mediante pequeños orificios perforados y están diseñadas para una o dos temporadas agrícolas. Aunque presentan menor uniformidad de distribución y mayor susceptibilidad a obstrucciones, su bajo costo inicial y facilidad de instalación las hacen convenientes para pequeños productores.

Para un desempeño adecuado con este tipo de cintillas es fundamental:

- Mantener presiones de operación moderadas (0.4–1.0 bar).
- Usar filtros y asegurar buena calidad del agua para evitar obstrucciones.
- Limitar la longitud de las líneas a 30–40 m para mantener una presión adecuada y distribución uniforme.

A pesar de que este tipo de cintillas presenta menor uniformidad en la distribución del agua y una mayor susceptibilidad a obstrucciones en comparación con las cintillas con emisores o laberintos incorporados, su elección responde a criterios económicos y prácticos, especialmente en sistemas temporales o de bajo presupuesto.

Estas cintillas están diseñadas para ser utilizadas durante una sola temporada agrícola, tras la cual son retiradas y reemplazadas. Este enfoque resulta conveniente para productores que buscan minimizar costos iniciales sin comprometer significativamente la funcionalidad básica del riego localizado.

Configuración hidráulica eficiente

Para lograr eficiencia hidráulica y uniformidad en la aplicación de agua:

- Se recomienda una configuración en paralelo, donde cada línea lateral se conecta directamente a la línea principal, minimizando pérdidas de presión.
- Las configuraciones en serie pueden generar desequilibrios de presión y caudales variables, especialmente al final del sistema.
- La longitud de cada cintilla debe limitarse para evitar caídas de presión excesivas entre el inicio y el final de la línea.

Consideraciones para el diseño

- El diámetro de las tuberías debe seleccionarse en función del caudal total y las especificaciones del fabricante.
- En terrenos inclinados, puede ser necesario sectorizar el sistema para garantizar uniformidad.
- El sistema debe incluir válvulas, filtros y reguladores de presión para proteger las cintillas contra obstrucciones y sobrepresiones.

3. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA

Este capítulo presenta el enfoque metodológico utilizado para la determinación de la demanda de agua, con base en la información recopilada durante el diagnóstico participativo y las visitas de campo a pequeños agricultores en Rabinal y San Miguel Chicaj, Baja Verapaz.

La determinación de la demanda se apoyó en los conceptos técnicos desarrollados en el Capítulo 2 e incorporó además variables productivas, sociales y organizativas observadas en el territorio. El dimensionamiento está centrado en la demanda real de agua de los cultivos y en las condiciones hidráulicas de extracción identificadas en campo. Este enfoque permite definir soluciones adaptadas a contextos rurales diversos, priorizando la viabilidad técnica, económica y operativa de los sistemas.

3.1. Condiciones productivas y sociales para el diseño del SPIS

Dado que este proyecto está enfocado en apoyar a pequeños productores, mayoritariamente dedicados a la agricultura de subsistencia, es fundamental asegurar la disponibilidad de agua para cultivo durante todo el año. Esto para mejorar la seguridad alimentaria de las familias rurales e incrementar la producción para generar excedentes que puedan ser comercializados en mercados locales, promoviendo ingresos estables y sostenibles a lo largo del año.

Los pequeños agricultores de los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj cultivan principalmente maíz, manía y frijol, junto con frutales (limón, mango, banano) y algunas hortalizas de ciclo corto (cebolla, güicoy, ayote). El maíz y el frijol, como alimentos básicos, se siembran durante la época lluviosa, aprovechando la disponibilidad natural de agua.

Sin embargo, son pocos los agricultores que logran producir durante la época seca, debido a la limitada disponibilidad de agua y a la falta de sistemas de riego eficientes. En respuesta,

- El MAGA y la FAO trabajan conjuntamente para apoyar a pequeños productores, con un enfoque especial en mujeres organizadas en estructuras comunitarias como los CADER. El objetivo es fomentar la producción agrícola durante todo el año. Para superar las dificultades técnicas y económicas del riego en la temporada seca, estas mujeres seleccionan de forma colectiva un lote de tierra donde cultivan hortalizas en conjunto. Comparten el uso del agua, dividen las tareas relacionadas con la preparación del terreno y el manejo del cultivo, y reparten la cosecha en partes iguales. Además, organizan sus horarios de trabajo agrícola de manera que puedan cumplir también con sus responsabilidades domésticas y el cuidado y educación de sus hijos. Este modelo colaborativo les permite reducir costos, optimizar el uso de los recursos hídricos y facilitar el acceso a asistencia técnica y oportunidades de comercialización.
- El MAGA también brinda apoyo a pequeños productores individuales, con iniciativas orientadas a mejorar su capacidad productiva mediante la promoción del riego eficiente, la entrega de semillas mejoradas, el fortalecimiento de la infraestructura de almacenamiento, como la construcción de estanques con geomembranas, y el acompañamiento técnico necesario. En los casos en que las parcelas no cuentan con

acceso a la red eléctrica, se propone el uso exclusivo de soluciones fotovoltaicas para el funcionamiento de los sistemas de bombeo.

En cuanto a infraestructura, la mayoría de los productores dispone de **pozos artesanales de baja profundidad** (10-36 m), con recarga limitada durante la temporada seca. El agua se extrae con bombas eléctricas, gracias a la cobertura de red existente. Los agricultores que no tienen acceso a la red utilizan gasolina para accionar las bombas de agua.

Las **parcelas son pequeñas**, las mujeres organizadas cultivan 0.5 Mz (0.35 ha), mientras que los agricultores individuales pueden cultivar hasta 2 Mz (1.4 ha), lo cual refuerza la necesidad de soluciones adaptadas a unidades productivas familiares, tanto en escala como en complejidad técnica.

Este diagnóstico productivo, de infraestructura y organizativo sirvió como base para dimensionar los SPIS, los cuales deben responder a las condiciones locales de disponibilidad de agua, a los calendarios estacionales de cultivo y a las capacidades operativas de los usuarios.

3.2. Condiciones de campo y desafíos de infraestructura para el diseño

Diseñar sistemas de riego solar para pequeños agricultores implica enfrentar importantes limitaciones de infraestructura. El almacenamiento de agua suele resolverse mediante estanques excavados, en lugar de tanques elevados tecnificados. Las fuentes principales, pozos artesanales, se recargan lentamente y rara vez han sido aforadas o caracterizadas hidráulicamente. Por esta razón, los agricultores utilizan bombas pequeñas (≈ 1 HP) que solo pueden operar entre 45 minutos y dos horas antes de agotar temporalmente la fuente de agua.

La red eléctrica, aunque presente en las dos comunidades, es inestable y costosa. Esto refuerza el interés de los agricultores en soluciones solares más confiables y autónomas. Sin embargo, **la coexistencia de una red eléctrica poco fiable complica la planificación**: por un lado, reduce la percepción del valor añadido del sistema solar, y por otro, introduce incertidumbre sobre cuánta capacidad debe cubrirse en caso de falla de la red.

En este contexto, el diseño deja de ser un ejercicio de optimización teórica y pasa a centrarse en asegurar la mayor cantidad de agua posible en los momentos disponibles, con sistemas técnicamente viables y adaptables. La recomendación técnica clave es dimensionar las bombas con base en la demanda promedio diaria y dimensionar los estanques de almacenamiento para cubrir un intervalo de riego de 2 a 3 días. Además, se deben considerar los picos de consumo vinculados a etapas fenológicas críticas de los cultivos, especialmente en hortalizas de ciclo corto.

Dado que la mayoría de los pozos presentan una recarga lenta, se considera una condición operativa crítica incorporar sensores de nivel que detengan automáticamente la bomba cuando el nivel de agua sea bajo y reactiven el sistema una vez que el pozo se haya recuperado. Esta estrategia de control asegura una extracción segura y eficiente, adaptada a la dinámica real del recurso, y refuerza la importancia de contar con almacenamiento suficiente que permita mantener la continuidad del riego durante los periodos en que el sistema no pueda operar activamente.

A estas restricciones técnicas se suman barreras logísticas y socioeconómicas, como el acceso limitado a equipos de calidad, la escasa disponibilidad de soporte técnico en zonas remotas, y la necesidad de adaptar las soluciones a la estacionalidad agrícola y a las formas de organización comunitaria. Estas condiciones reafirman que el diseño del SPIS debe ser flexible, modular y profundamente contextualizado.

3.3. Estimación de la demanda por tipo de cultivo

La estimación de la demanda de agua es el punto de partida técnico para el dimensionamiento de los SPIS. Esta demanda debe cubrir tanto las necesidades de riego para cultivos básicos de subsistencia como el frijol y maíz, además de hortalizas para promover una mejor nutrición de las familias. El enfoque de diseño se centra en garantizar un suministro de agua suficiente durante la época seca, cuando el riego es indispensable para la producción agrícola.

La demanda de agua se estimó siguiendo el método recomendado por la FAO, basado en la evapotranspiración de referencia (ET_o) y los coeficientes del cultivo (K_c) ajustados por etapa fenológica. Este enfoque permite calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de manera integral para toda la superficie sembrada (Sección 2.4.).

A partir de la estimación de la ET_o ajustada (Tabla 2) se calculó la demanda de agua específica para distintos cultivos aplicando los K_c por etapa fenológica y considerando la duración del ciclo. De este modo, se obtiene la ET_c, que representa la demanda neta de agua por hectárea a lo largo de todo el ciclo productivo. Las Tabla 3 y Tabla 4 permiten comparar la demanda de agua de distintos cultivos comunes en el corredor seco de Baja Verapaz, expresados tanto en términos de ET_c para todo el ciclo, y para las distintas etapas de desarrollo, como también volumen total de agua necesario riego. Para facilitar una visualización rápida de la demanda según el tamaño de la parcela, se incluyen los volúmenes totales requeridos por ciclo y los promedios diarios para superficies de 1 ha (≈ 1.43 mz⁷), 0.35 hectáreas (≈ 0.5 mz), 0.7 Ha (≈ 1 mz) y 1.4 Ha (≈ 2 mz).⁸

⁷ En Guatemala, la unidad de medida de área de uso común en el ámbito agrícola es la manzana (mz).

⁸ 1 hectárea (ha) = 10,000 m² \approx 1.43 mz; 1 mz = 7,000 m² \approx 0.70 ha.

Debido al aumento de las temperaturas y menor humedad, se estima que la evapotranspiración podría incrementarse entre un 5 % y un 15 % en regiones secas, particularmente bajo escenarios de cambio climático de intensidad intermedia a alta.⁹ La Tabla 3 muestra los valores estimados considerando un incremento del 10% del ETc, como una aproximación al posible impacto climático en la región, mientras que la Tabla 4 hace los ajustes correspondientes a un aumento del 15% del ETc. El diseño de los SPIS presentado más adelante considera el 10%.

La mayor demanda de agua se concentra durante las etapas de desarrollo vegetativo y floración/fructificación, que representan los momentos más activos en el crecimiento estructural y reproductivo de los cultivos. Al observar la duración de estas dos etapas combinadas en los cultivos evaluados, se identifica un rango aproximado de entre 60 y 100 días. Este periodo representa más de la mitad del ciclo productivo en la mayoría de los cultivos, y corresponde al momento en que el riego debe estar mejor planificado y ejecutado. Por lo tanto, la gestión del riego debe enfocarse en cubrir adecuadamente las necesidades hídricas durante estos 60 a 100 días clave, ya que cualquier déficit en este intervalo puede afectar directamente la productividad y la calidad de la cosecha. El diseño de calendarios de riego y asignación de recursos hídricos debe tomar este rango como prioridad técnica.

El análisis muestra que los cultivos de maíz y cebolla presentan las demandas de agua más altas, con valores aproximados de 3,700 m³/ha y 3,900 m³/ha por ciclo, correspondientes a ajustes del 10 % y 15 %, respectivamente, para reflejar el impacto del cambio climático.

El diseño de los sistemas fotovoltaicos para bombeo de agua debe adaptarse tanto a la demanda de agua como a las condiciones físicas de la fuente, el sistema de almacenamiento y el punto de entrega. En este estudio, el dimensionamiento no se enfoca en la optimización energética, sino en garantizar la disponibilidad de agua para riego, considerando que existen múltiples incertidumbres, tales como:

- Variabilidad en los productos agrícolas. Sin embargo, como todos los pequeños productores cultivan maíz y éste es de alto consumo de agua, se busca hacer el dimensionamiento para este producto.
- Tamaño variable de las pequeñas parcelas: Éstas oscilan entre 0.35 y 1.40 ha (0.5 y 2 mz). Sin embargo, el diseño está dirigido principalmente a grupos organizados de mujeres productoras, quienes actualmente cultivan 0.35 ha (0.5 mz), pero podrían ampliar el área cultivada en el futuro, ya que muchos de los terrenos que ocupan tienen una extensión cercana a 0.69 ha (1 mz).
- Limitaciones técnicas de los pozos existentes: Los diseños solo deberían aplicarse a pozos que hayan sido aforados. Actualmente, los pozos artesanales en Rabinal y San Miguel Chicaj no cuentan con aforo, presentan recarga lenta y requieren ser profundizados para poder diseñar un sistema funcional y sostenible.

Para asegurar la funcionalidad del sistema en un rango amplio de escenarios productivos, **el maíz fue seleccionado como cultivo de referencia para el dimensionamiento, debido a su alta demanda de**

⁹ Monterroso-Rivas, Alejandro I., y Gómez-Díaz, Jesús D. (2021). *Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y período de crecimiento en México*. Revista Terra Latinoamericana. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100105&script=sci_arttext

agua, su rol estratégico en la seguridad alimentaria local y su ciclo relativamente largo, que plantea un escenario exigente en términos de requerimiento hídrico.

Tabla 3. Demanda de agua por cultivo, por etapa fenológica, considerando un 10% del efecto del cambio climático en la evapotranspiración.

| Cultivo | Etapa fenológica | Día juliano | Duración (días) | Kc | Eto promedio (mm/d) | ETc (mm) | ETc ajustado 10% (mm) | Volumen (m³) 1 ha | Volumen (m³) 0.5 manzana | Volumen (m³) 1 manzana | Volumen (m³) 2 manzanas | Volumen diario (m³/día) 1 ha | Volumen diario (m³/día) 0.5 manzana | Volumen diario (m³/día) 1 manzana | Volumen diario (m³/día) 2 manzanas |
|----------|----------------------------|-------------|-----------------|------|---------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Cilantro | Establecimiento | 32 | 10 | 0.65 | 2.88 | 18.72 | 20.59 | 205.92 | 72.07 | 144.14 | 288.29 | 20.59 | 7.21 | 14.41 | 28.83 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 32 | 1.05 | 3.10 | 104.13 | 114.54 | 1145.39 | 400.89 | 801.77 | 1603.55 | 35.79 | 12.53 | 25.06 | 50.11 |
| | Floración / Fructificación | 74 | 18 | 1.05 | 3.39 | 64.01 | 70.42 | 704.16 | 246.46 | 492.91 | 985.82 | 39.12 | 13.69 | 27.38 | 54.77 |
| | Maduración / Cosecha | 92 | 10 | 0.75 | 3.51 | 26.33 | 28.96 | 289.58 | 101.35 | 202.70 | 405.41 | 28.96 | 10.14 | 20.27 | 40.54 |
| | TOTAL | | 70 | | | 213.19 | 234.50 | 2345.04 | 820.77 | 1641.53 | 3283.06 | 33.50 | 11.73 | 23.45 | 46.90 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 70 | | | | | | | | | | | | |
| Cebolla | Establecimiento | 32 | 16 | 0.7 | 2.88 | 32.26 | 35.48 | 354.82 | 124.19 | 248.37 | 496.74 | 22.18 | 7.76 | 15.52 | 31.05 |
| | Desarrollo vegetativo | 48 | 40 | 1.05 | 3.23 | 135.66 | 149.23 | 1492.26 | 522.29 | 1044.58 | 2089.16 | 37.31 | 13.06 | 26.12 | 52.23 |
| | Floración / Fructificación | 88 | 38 | 1.05 | 3.46 | 137.86 | 151.64 | 1516.40 | 530.74 | 1061.48 | 2122.96 | 39.91 | 13.97 | 27.93 | 55.87 |
| | Maduración / Cosecha | 126 | 16 | 0.75 | 3.17 | 38.04 | 41.84 | 418.44 | 146.45 | 292.91 | 585.82 | 26.15 | 9.15 | 18.31 | 36.61 |
| | TOTAL | | 110 | | | 343.81 | 378.19 | 3781.92 | 1323.67 | 2647.34 | 5294.68 | 34.38 | 12.03 | 24.07 | 48.13 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 110 | | | | | | | | | | | | |
| Rábano | Establecimiento | 32 | 9 | 0.7 | 2.88 | 18.14 | 19.96 | 199.58 | 69.85 | 139.71 | 279.42 | 22.18 | 7.76 | 15.52 | 31.05 |
| | Desarrollo vegetativo | 41 | 24 | 1 | 2.98 | 71.62 | 78.78 | 787.78 | 275.72 | 551.44 | 1102.89 | 32.82 | 11.49 | 22.98 | 45.95 |
| | Floración / Fructificación | 65 | 21 | 1 | 3.38 | 70.98 | 78.08 | 780.78 | 273.27 | 546.55 | 1093.09 | 37.18 | 13.01 | 26.03 | 52.05 |
| | Maduración / Cosecha | 86 | 6 | 0.8 | 3.40 | 16.33 | 17.96 | 179.63 | 62.87 | 125.74 | 251.48 | 29.94 | 10.48 | 20.96 | 41.91 |
| | TOTAL | | 60 | | | 177.07 | 194.78 | 1947.77 | 681.72 | 1363.44 | 2726.87 | 32.46 | 11.36 | 22.72 | 45.45 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 60 | | | | | | | | | | | | |
| Sandía | Establecimiento | 32 | 10 | 0.6 | 2.88 | 17.28 | 19.01 | 190.08 | 66.53 | 133.06 | 266.11 | 19.01 | 6.65 | 13.31 | 26.61 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 30 | 1.05 | 3.08 | 97.02 | 106.72 | 1067.22 | 373.53 | 747.05 | 1494.11 | 35.57 | 12.45 | 24.90 | 49.80 |
| | Floración / Fructificación | 72 | 45 | 1.05 | 3.46 | 163.25 | 179.57 | 1795.74 | 628.51 | 1257.02 | 2514.03 | 39.91 | 13.97 | 27.93 | 55.87 |
| | Maduración / Cosecha | 117 | 15 | 0.9 | 3.26 | 44.02 | 48.43 | 484.26 | 169.49 | 338.98 | 677.96 | 32.28 | 11.30 | 22.60 | 45.20 |
| | TOTAL | | 100 | | | 321.57 | 353.73 | 3537.30 | 1238.05 | 2476.11 | 4952.21 | 35.37 | 12.38 | 24.76 | 49.52 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 100 | | | | | | | | | | | | |
| Tomate | Establecimiento | 32 | 10 | 0.6 | 2.88 | 17.28 | 19.01 | 190.08 | 66.53 | 133.06 | 266.11 | 19.01 | 6.65 | 13.31 | 26.61 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 30 | 0.9 | 3.08 | 83.16 | 91.48 | 914.76 | 320.17 | 640.33 | 1280.66 | 30.49 | 10.67 | 21.34 | 42.69 |
| | Floración / Fructificación | 72 | 50 | 0.9 | 3.45 | 155.43 | 170.97 | 1709.73 | 598.41 | 1196.81 | 2393.62 | 34.20 | 11.97 | 23.94 | 47.87 |
| | Maduración / Cosecha | 122 | 10 | 0.8 | 3.17 | 25.36 | 27.90 | 278.96 | 97.64 | 195.27 | 390.54 | 27.90 | 9.76 | 19.53 | 39.05 |
| | TOTAL | | 100 | | | 281.23 | 309.35 | 3093.53 | 1082.74 | 2165.47 | 4330.94 | 30.94 | 10.83 | 21.66 | 43.31 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 100 | | | | | | | | | | | | |
| Pepino | Establecimiento | 32 | 9 | 0.6 | 2.88 | 15.55 | 17.11 | 171.07 | 59.88 | 119.75 | 239.50 | 19.01 | 6.65 | 13.31 | 26.61 |
| | Desarrollo vegetativo | 41 | 27 | 1 | 3.03 | 81.76 | 89.93 | 899.32 | 314.76 | 629.52 | 1259.04 | 33.31 | 11.66 | 23.32 | 46.63 |
| | Floración / Fructificación | 68 | 40 | 1 | 3.44 | 137.40 | 151.14 | 1511.40 | 528.99 | 1057.98 | 2115.96 | 37.79 | 13.23 | 26.45 | 52.90 |
| | Maduración / Cosecha | 108 | 14 | 0.8 | 3.49 | 39.04 | 42.95 | 429.48 | 150.32 | 300.63 | 601.27 | 30.68 | 10.74 | 21.47 | 42.95 |
| | TOTAL | | 90 | | | 273.75 | 301.13 | 3011.26 | 1053.94 | 2107.88 | 4215.77 | 33.46 | 11.71 | 23.42 | 46.84 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 90 | | | | | | | | | | | | |
| Frijol | Establecimiento | 32 | 13 | 0.5 | 2.88 | 18.72 | 20.59 | 205.92 | 72.07 | 144.14 | 288.29 | 15.84 | 5.54 | 11.09 | 22.18 |
| | Desarrollo vegetativo | 45 | 29 | 0.8 | 3.12 | 72.41 | 79.65 | 796.48 | 278.77 | 557.54 | 1115.07 | 27.47 | 9.61 | 19.23 | 38.45 |
| | Floración / Fructificación | 74 | 30 | 0.8 | 3.44 | 82.46 | 90.71 | 907.10 | 317.49 | 634.97 | 1269.95 | 30.24 | 10.58 | 21.17 | 42.33 |
| | Maduración / Cosecha | 104 | 13 | 0.85 | 3.51 | 38.79 | 42.66 | 426.64 | 149.32 | 298.65 | 597.30 | 32.82 | 11.49 | 22.97 | 45.95 |
| | TOTAL | | 85 | | | 212.38 | 233.61 | 2336.14 | 817.65 | 1635.30 | 3270.60 | 27.48 | 9.62 | 19.24 | 38.48 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 85 | | | | | | | | | | | | |
| Maíz | Establecimiento | 32 | 11 | 0.3 | 2.88 | 9.50 | 10.45 | 104.54 | 36.59 | 73.18 | 146.36 | 9.50 | 3.33 | 6.65 | 13.31 |
| | Desarrollo vegetativo | 43 | 27 | 1.2 | 3.07 | 99.31 | 109.24 | 1092.37 | 382.33 | 764.66 | 1529.31 | 40.46 | 14.16 | 28.32 | 56.64 |
| | Floración / Fructificación | 70 | 50 | 1.2 | 3.46 | 207.30 | 228.03 | 2280.30 | 798.11 | 1596.21 | 3192.42 | 45.61 | 15.96 | 31.92 | 63.85 |
| | Maduración / Cosecha | 120 | 22 | 0.35 | 3.19 | 24.52 | 26.98 | 269.77 | 94.42 | 188.84 | 377.68 | 12.26 | 4.29 | 8.58 | 17.17 |
| | TOTAL | | 110 | | | 340.64 | 374.70 | 3746.98 | 1311.44 | 2622.89 | 5245.77 | 34.06 | 11.92 | 23.84 | 47.69 |
| | PROMEDIO DIARIO | | 110 | | | | | | | | | | | | |

Tabla 4. Demanda de agua por cultivo, por etapa fenológica, considerando un 15% del efecto del cambio climático en la evapotranspiración.

| Cultivo | Etapa fenológica | Día juliano | Duración (días) | Kc | Eto promedio (mm/d) | ETc (mm) | ETc ajustado 15% (mm) | Volumen (m³) 1 ha | Volumen (m³) 0.5 manzana | Volumen (m³) 1 manzana | Volumen (m³) 2 manzanas | Volumen diario (m³/día) 1 ha | Volumen diario (m³/día) 0.5 manzana | Volumen diario (m³/día) 1 manzana | Volumen diario (m³/día) 2 manzanas |
|-----------------|----------------------------|-------------|-----------------|------|---------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Cilantro | Establecimiento | 32 | 10 | 0.65 | 2.88 | 18.72 | 21.53 | 215.28 | 75.35 | 150.70 | 301.39 | 21.53 | 7.54 | 15.07 | 30.14 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 32 | 1.05 | 3.10 | 104.13 | 119.75 | 1197.45 | 419.11 | 838.22 | 1676.44 | 37.42 | 13.10 | 26.19 | 52.39 |
| | Floración / Fructificación | 74 | 18 | 1.05 | 3.39 | 64.01 | 73.62 | 736.16 | 257.66 | 515.32 | 1030.63 | 40.90 | 14.31 | 28.63 | 57.26 |
| | Maduración / Cosecha | 92 | 10 | 0.75 | 3.51 | 26.33 | 30.27 | 302.74 | 105.96 | 211.92 | 423.83 | 30.27 | 10.60 | 21.19 | 42.38 |
| | TOTAL | | 70 | | | 213.19 | 245.16 | 2451.64 | 858.07 | 1716.15 | 3432.29 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 35.02 | 12.26 | 24.52 | 49.03 | |
| Cebolla | Establecimiento | 32 | 16 | 0.7 | 2.88 | 32.26 | 37.09 | 370.94 | 129.83 | 259.66 | 519.32 | 23.18 | 8.11 | 16.23 | 32.46 |
| | Desarrollo vegetativo | 48 | 40 | 1.05 | 3.23 | 135.66 | 156.01 | 1560.09 | 546.03 | 1092.06 | 2184.13 | 39.00 | 13.65 | 27.30 | 54.60 |
| | Floración / Fructificación | 88 | 38 | 1.05 | 3.46 | 137.86 | 158.53 | 1585.33 | 554.86 | 1109.73 | 2219.46 | 41.72 | 14.60 | 29.20 | 58.41 |
| | Maduración / Cosecha | 126 | 16 | 0.75 | 3.17 | 38.04 | 43.75 | 437.46 | 153.11 | 306.22 | 612.44 | 27.34 | 9.57 | 19.14 | 38.28 |
| | TOTAL | | 110 | | | 343.81 | 395.38 | 3953.82 | 1383.84 | 2767.68 | 5535.35 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 35.94 | 12.58 | 25.16 | 50.32 | |
| Rábano | Establecimiento | 32 | 9 | 0.7 | 2.88 | 18.14 | 20.87 | 208.66 | 73.03 | 146.06 | 292.12 | 23.18 | 8.11 | 16.23 | 32.46 |
| | Desarrollo vegetativo | 41 | 24 | 1 | 2.98 | 71.62 | 82.36 | 823.58 | 288.25 | 576.51 | 1153.02 | 34.32 | 12.01 | 24.02 | 48.04 |
| | Floración / Fructificación | 65 | 21 | 1 | 3.38 | 70.98 | 81.63 | 816.27 | 285.70 | 571.39 | 1142.78 | 38.87 | 13.60 | 27.21 | 54.42 |
| | Maduración / Cosecha | 86 | 6 | 0.8 | 3.40 | 16.33 | 18.78 | 187.79 | 65.73 | 131.45 | 262.91 | 31.30 | 10.95 | 21.91 | 43.82 |
| | TOTAL | | 60 | | | 177.07 | 203.63 | 2036.30 | 712.71 | 1425.41 | 2850.82 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 33.94 | 11.88 | 23.76 | 47.51 | |
| Sandía | Establecimiento | 32 | 10 | 0.6 | 2.88 | 17.28 | 19.87 | 198.72 | 69.55 | 139.10 | 278.21 | 19.87 | 6.96 | 13.91 | 27.82 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 30 | 1.05 | 3.08 | 97.02 | 111.57 | 1115.73 | 390.51 | 781.01 | 1562.02 | 37.19 | 13.02 | 26.03 | 52.07 |
| | Floración / Fructificación | 72 | 45 | 1.05 | 3.46 | 163.25 | 187.74 | 1877.36 | 657.08 | 1314.15 | 2628.31 | 41.72 | 14.60 | 29.20 | 58.41 |
| | Maduración / Cosecha | 117 | 15 | 0.9 | 3.26 | 44.02 | 50.63 | 506.27 | 177.20 | 354.39 | 708.78 | 33.75 | 11.81 | 23.63 | 47.25 |
| | TOTAL | | 100 | | | 321.57 | 369.81 | 3698.08 | 1294.33 | 2588.66 | 5177.31 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 36.98 | 12.94 | 25.89 | 51.77 | |
| Tomate | Establecimiento | 32 | 10 | 0.6 | 2.88 | 17.28 | 19.87 | 198.72 | 69.55 | 139.10 | 278.21 | 19.87 | 6.96 | 13.91 | 27.82 |
| | Desarrollo vegetativo | 42 | 30 | 0.9 | 3.08 | 83.16 | 95.63 | 956.34 | 334.72 | 669.44 | 1338.88 | 31.88 | 11.16 | 22.32 | 44.63 |
| | Floración / Fructificación | 72 | 50 | 0.9 | 3.45 | 155.43 | 178.74 | 1787.45 | 625.61 | 1251.21 | 2502.42 | 35.75 | 12.51 | 25.02 | 50.05 |
| | Maduración / Cosecha | 122 | 10 | 0.8 | 3.17 | 25.36 | 29.16 | 291.64 | 102.07 | 204.15 | 408.30 | 29.16 | 10.21 | 20.42 | 40.83 |
| | TOTAL | | 100 | | | 281.23 | 323.41 | 3234.15 | 1131.95 | 2263.90 | 4527.80 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 32.34 | 11.32 | 22.64 | 45.28 | |
| Pepino | Establecimiento | 32 | 9 | 0.6 | 2.88 | 15.55 | 17.89 | 178.85 | 62.60 | 125.19 | 250.39 | 19.87 | 6.96 | 13.91 | 27.82 |
| | Desarrollo vegetativo | 41 | 27 | 1 | 3.03 | 81.76 | 94.02 | 940.19 | 329.07 | 658.14 | 1316.27 | 34.82 | 12.19 | 24.38 | 48.75 |
| | Floración / Fructificación | 68 | 40 | 1 | 3.44 | 137.40 | 158.01 | 1580.10 | 553.04 | 1106.07 | 2212.14 | 39.50 | 13.83 | 27.65 | 55.30 |
| | Maduración / Cosecha | 108 | 14 | 0.8 | 3.49 | 39.04 | 44.90 | 449.00 | 157.15 | 314.30 | 628.60 | 32.07 | 11.23 | 22.45 | 44.90 |
| | TOTAL | | 90 | | | 273.75 | 314.81 | 3148.14 | 1101.85 | 2203.70 | 4407.39 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 34.98 | 12.24 | 24.49 | 48.97 | |
| Frijol | Establecimiento | 32 | 13 | 0.5 | 2.88 | 18.72 | 21.53 | 215.28 | 75.35 | 150.70 | 301.39 | 16.56 | 5.80 | 11.59 | 23.18 |
| | Desarrollo vegetativo | 45 | 29 | 0.8 | 3.12 | 72.41 | 83.27 | 832.68 | 291.44 | 582.88 | 1165.76 | 28.71 | 10.05 | 20.10 | 40.20 |
| | Floración / Fructificación | 74 | 30 | 0.8 | 3.44 | 82.46 | 94.83 | 948.34 | 331.92 | 663.84 | 1327.67 | 31.61 | 11.06 | 22.13 | 44.26 |
| | Maduración / Cosecha | 104 | 13 | 0.85 | 3.51 | 38.79 | 44.60 | 446.03 | 156.11 | 312.22 | 624.45 | 34.31 | 12.01 | 24.02 | 48.03 |
| | TOTAL | | 85 | | | 212.38 | 244.23 | 2442.33 | 854.82 | 1709.63 | 3419.27 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 28.73 | 10.06 | 20.11 | 40.23 | |
| Maíz | Establecimiento | 32 | 11 | 0.3 | 2.88 | 9.50 | 10.93 | 109.30 | 38.25 | 76.51 | 153.01 | 9.94 | 3.48 | 6.96 | 13.91 |
| | Desarrollo vegetativo | 43 | 27 | 1.2 | 3.07 | 99.31 | 114.20 | 1142.02 | 399.71 | 799.41 | 1598.83 | 42.30 | 14.80 | 29.61 | 59.22 |
| | Floración / Fructificación | 70 | 50 | 1.2 | 3.46 | 207.30 | 238.40 | 2383.95 | 834.38 | 1668.77 | 3337.53 | 47.68 | 16.69 | 33.38 | 66.75 |
| | Maduración / Cosecha | 120 | 22 | 0.35 | 3.19 | 24.52 | 28.20 | 282.03 | 98.71 | 197.42 | 394.84 | 12.82 | 4.49 | 8.97 | 17.95 |
| | TOTAL | | 110 | | | 340.64 | 391.73 | 3917.30 | 1371.05 | 2742.11 | 5484.22 | | | | |
| PROMEDIO DIARIO | | | | | | | | | | | 35.61 | 12.46 | 24.93 | 49.86 | |

3.4. Condiciones y costos de perforación de pozos artesanales

Para lograr un diseño funcional y sostenible de los sistemas de bombeo, **sería ideal considerar la profundización de los pozos existentes**, especialmente en aquellas zonas donde el acceso al agua subterránea es limitado o poco confiable.

En la región de San Miguel Chicaj y Rabinal, el costo de perforación de un pozo artesanal varía considerablemente según el tipo de suelo. A mayo de 2025, el precio por metro en terrenos blandos oscila entre Q30 y Q60, con un rendimiento de perforación que va de 3 a 4.2 metros por día, dependiendo de la tarifa y las condiciones específicas del sitio.

Por el contrario, en suelos rocosos o difíciles, el costo por metro puede incrementarse sustancialmente, ubicándose entre Q150 y Q600 por metro, ya que el avance disminuye significativamente, con una velocidad de perforación de apenas 0.5 a 1 metro por día. Esta amplia variabilidad subraya la importancia de realizar una evaluación previa del terreno, ya que influye directamente en el presupuesto total y en la duración del proyecto.

Además, es importante considerar el aforo de los pozos, un requisito técnico indispensable para diseñar adecuadamente el sistema de bombeo. En Guatemala, el costo del aforo varía entre Q1,500 y Q5,000, dependiendo del tipo de pozo y la duración de la prueba.

Tabla 5. Estimación de días y costos para la perforación de pozos artesanales según profundidad y tipo de suelo

| Profundidad (m) | Días blando (mín – máx) | Días rocoso (mín – máx) | Costo blando (Q) (mín – máx) | Costo rocoso (Q) (mín – máx) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 10 | 2– 4 | 10 – 20 | 300 – 600 | 1480 – 5900 |
| 20 | 4 – 6 | 20 – 40 | 600 – 1200 | 2960 – 11800 |
| 30 | 7 – 10 | 30 – 60 | 900 – 1800 | 4440 – 17700 |
| 40 | 9 – 14 | 40 – 80 | 1200 – 2400 | 5920 – 23600 |

3.5. Sistemas de almacenamiento observados en campo

Durante las visitas técnicas realizadas en Rabinal y San Miguel Chicaj, se identificaron diversas soluciones de almacenamiento de agua ya implementadas por los pequeños productores. Estos sistemas, contruidos principalmente como estanques excavados a nivel del suelo, reflejan tanto las capacidades técnicas y económicas de los agricultores como las dimensiones de terreno que están en condiciones de destinar o dispuestas a destinar para este fin. La infraestructura observada constituye una referencia práctica clave para el diseño del sistema de almacenamiento dentro de los SPIS, al evidenciar los límites reales de espacio, inversión y manejo que enfrentan los usuarios.

La Tabla 6 presenta un resumen de las dimensiones físicas y los volúmenes útiles de almacenamiento de los sistemas observados en las parcelas visitadas. Todos los estanques evaluados se encuentran

dentro de un rango de 24 a 44 m³, lo cual resulta coherente con los requerimientos mostrados en las Tabla 3 y Tabla 4 definidos para el riego de 0.35 ha equivalente a media mz de cultivo.

- Durante la época seca, el cultivo de maíz (cultivo de referencia para el diseño de los SPIS) requiere riego cada tres días, con una demanda estimada de 14 m³/día en su etapa fenológica más exigente. Por tanto, se requiere una capacidad de almacenamiento mínima de 42 m³ para cubrir un ciclo completo de tres días de riego. En este contexto, el estanque 5, con su volumen útil actual, permite almacenar el volumen necesario para satisfacer dicha demanda.
- Por su parte, el cultivo de cebolla presenta una demanda promedio de 13 m³/día. En este caso, el estanque 2 ofrece una capacidad suficiente para almacenar aproximadamente 2.3 días de riego, lo que proporciona un margen de seguridad ante eventuales interrupciones en la captación de agua o en la generación fotovoltaica. Este tipo de reserva operativa contribuye a garantizar la continuidad del servicio de riego incluso en condiciones climáticas o técnicas desfavorables.

Tabla 6. Dimensiones de sistemas de almacenamiento de agua observados en campo.

| Estanque | Largo (m) | Ancho (m) | Profundidad (m) | Volúmen útil (m ³) |
|----------|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------|
| 1 | 7 | 4 | 1.5 | 42 |
| 2 | 5 | 5 | 1.2 | 30 |
| 3 | 9 | 4 | 1.2 | 43 |
| 4 | 4 | 4 | 1.5 | 24 |
| 5 | 4 | 8 | 1.4 | 44 |

4. CONFIGURACIONES DE LOS SPIS

El diseño de los sistemas de riego solar en Baja Verapaz responde a la necesidad de soluciones técnicas adaptadas a las condiciones locales, tanto en términos económicos como operativos. Ante una disponibilidad irregular de energía eléctrica y pozos con recarga limitada, los pequeños productores requieren configuraciones que optimicen el uso del agua y la energía, integrando tecnologías apropiadas con conocimientos locales.

Con un SPIS, el sistema FV puede activar la bomba en las horas de sol tanto para el almacenamiento de agua como para el rebombeo hacia el cultivo. Esta configuración permite asegurar el suministro de agua en momentos críticos sin necesidad de tecnologías complejas. El almacenamiento de agua permite aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a la variabilidad climática. Se encontraron dos tipos de almacenamiento durante el trabajo de campo: Estanques a nivel del suelo y tanques elevados.

- Una estrategia ampliamente utilizada es el uso de estanques excavados, construidos con materiales disponibles localmente y, en muchos casos, por mano de obra familiar. Estos permiten almacenar agua, para luego rebombearla hacia los cultivos.
- Otra alternativa identificada, aunque poco común, es el uso de tanques elevados de capacidad limitada. Los tanques elevados permiten la distribución de agua por gravedad y son especialmente útiles en terrenos con pendiente favorable y para cultivos ubicados cerca del tanque, ya que reduce la necesidad de rebombeo, simplifica la operación y asegura el riego a cualquier hora del día.

Asimismo, dadas las limitaciones del servicio eléctrico en la región (85 % de cobertura, pero con costos elevados e interrupciones frecuentes), en el presente análisis se está evaluado la incorporación de sistemas híbridos solar-red, que combinan un sistema fotovoltaico con la posibilidad de respaldo mediante la red eléctrica. Estos sistemas están diseñados para operar de forma flexible y segura, priorizando la energía solar y utilizando la red solo cuando sea necesario, lo que los hace especialmente apropiados para comunidades rurales con recursos limitados.

A continuación, se presentan cuatro configuraciones representativas de SPIS con potencial a ser utilizadas en la región, que ilustran las distintas formas de almacenamiento y distribución de agua, según las condiciones del terreno, la infraestructura existente y las necesidades específicas de los agricultores.

4.1. “Off-grid” SPIS con estanque intermedio y doble bombeo

En esta configuración, el sistema fotovoltaico alimenta una bomba sumergible que extrae agua del pozo hacia un estanque a nivel del suelo. Posteriormente, una bomba superficial o sumergible, también alimentada por energía solar, conduce el agua hacia el sistema de riego por goteo.

Esta solución es especialmente útil para pozos con baja tasa de recarga, ya que permite realizar la extracción durante las horas de sol, siempre que el nivel del pozo sea aprovechable, y almacenar el agua temporalmente.

Se prevé que el sistema opere de manera intermitente, regulado por **sensores de nivel**, debido a las características de los pozos artesanales de baja recarga identificados. Estos sensores cumplen una función clave en el diseño: detienen automáticamente la bomba cuando el nivel del pozo desciende por debajo de un umbral seguro y la reactivan una vez que el nivel se ha recuperado. Esto evita el funcionamiento en seco, protege la bomba y permite adaptar el sistema a la dinámica real de recarga del acuífero. A medida que se mejore la infraestructura de los pozos, las bombas podrán operar durante todas las horas de sol. Las características de arranque de cada bomba determinan el límite mínimo de radiación solar para operar.

Para los pequeños productores que dependen exclusivamente de la lluvia y no disponen de sistemas de almacenamiento, la construcción de estanques representa una solución viable. Estos pueden construirse con mano de obra local, empleando técnicas simples y materiales disponibles en la comunidad. Ya sea revestidos o no, estos reservorios constituyen una alternativa accesible, eficiente y adaptable a diversos contextos rurales.

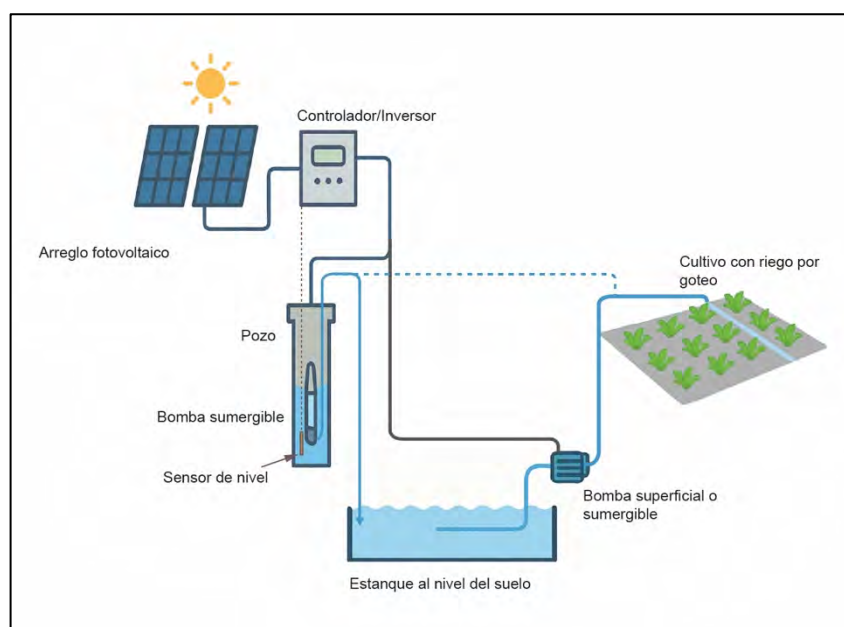


Figura 4. Off-Grid SPIS con estanque intermedio y doble bombeo.

4.1.1. Evaluación de configuración: Uno o dos arreglos FV para alimentar las bombas solares CD

Las bombas solares de corriente directa (CD) están diseñadas para ser alimentadas directamente con la energía generada por el arreglo FV a través de un controlador solar. Este controlador regula el voltaje, la corriente y el arranque de la bomba, y en muchos casos incluye funciones de protección (sobretensión, baja irradiancia y operación en seco).

Este análisis compara la viabilidad técnica y económica de alimentar dos bombas solares CD mediante sistemas FV. Las configuraciones posibles son:

Configuración 1: Dos arreglos FV independientes (uno por bomba). Cada bomba cuenta con su propio arreglo FV solar y su propio controlador. Es la configuración más tradicional y segura para operar dos bombas CD de forma simultánea o independiente.

Configuración 2: Un solo arreglo FV compartido entre dos bombas. En esta configuración, un mismo campo solar alimenta a dos bombas solares CD. Esto puede realizarse con un solo controlador especializado que opera dos bombas.

Tabla 7. Comparación técnica de configuraciones de alimentación para bombas DC.

| Configuración | Ventajas | Desventajas |
|---------------|--|--|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> Autonomía total: las bombas pueden operar de forma independiente o simultánea, sin interferencias. Operación segura: se evita el riesgo de conflicto entre controladores (cada uno tiene su fuente dedicada). Diseño optimizado: cada arreglo puede adaptarse a la profundidad, caudal y características de su bomba. Facilidad de mantenimiento modular: si un sistema falla, el otro puede seguir operando. Expansión sencilla: es más fácil reemplazar o actualizar uno de los sistemas sin afectar al otro. | <ul style="list-style-type: none"> Mayor costo inicial: se duplican estructuras, paneles (en algunos casos), cableado y controladores. Más espacio requerido: se necesitan dos áreas con buena radiación solar. Mantenimiento doble: hay más componentes que requieren revisión, limpieza y monitoreo. |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> Menor costo en componentes: se requiere solo un arreglo FV, una estructura y un controlador. Sistema compacto: ocupa menos espacio físico y reduce la cantidad de cableado. Control centralizado: algunos controladores permiten priorizar bombas, alternar operación o incluso operar simultáneamente si están diseñados para ello. Expansión sencilla: es más fácil reemplazar o actualizar uno de los sistemas sin afectar al otro. | <ul style="list-style-type: none"> Mayor sofisticación técnica: se necesita un controlador especializado, más costoso y menos común que los controladores estándar. Limitaciones operativas: si el controlador no permite operación simultánea, las bombas deben funcionar en turnos. Punto único de falla: si el controlador se daña, ambas bombas quedan fuera de servicio. |

4.1.2. Evaluación de configuración: Uno o dos arreglos FV para alimentar bombas de agua CA

Las bombas convencionales de corriente alterna (CA) requieren que la energía solar generada en corriente continua (CD) por los paneles sea convertida a CA mediante un inversor. Este inversor puede ser del tipo off-grid, híbrido con función de bombeo, o conectado a red en sistemas más complejos. Es fundamental que el inversor esté adecuadamente dimensionado para manejar la carga de arranque y operación de las bombas.

En esta sección se analiza la viabilidad técnica y económica de alimentar dos bombas CA mediante sistemas FV, comparando dos configuraciones posibles:

Configuración 1: Dos arreglos FV independientes (uno por bomba). Cada bomba CA cuenta con su propio arreglo FV y su propio inversor. Esta configuración permite que las bombas funcionen de forma autónoma y es especialmente útil si las bombas tienen características diferentes (caudal, profundidad, tipo) o deben operar de manera simultánea sin restricciones.

Configuración 2: Un solo arreglo FV compartido entre dos bombas. Un mismo arreglo FV alimenta un único inversor, que a su vez alimenta ambas bombas CA. Esta opción requiere que el inversor esté sobredimensionado o que las bombas operen en horarios distintos para evitar sobrecarga. En algunos casos, se puede implementar lógica de control o automatización para alternar la operación de las bombas.

Tabla 8. Comparación técnica de configuraciones de alimentación para bombas CA.

| Configuración | Ventajas | Desventajas |
|---------------|--|---|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> Autonomía total: ambas bombas pueden operar de forma simultánea o independiente sin interferencias. Operación segura: cada inversor maneja solo una carga. Diseño optimizado: cada sistema puede adaptarse al perfil de su bomba. Mantenimiento modular: si un sistema falla, el otro sigue operando. Alta escalabilidad: permite reemplazos, expansiones o actualizaciones sin afectar el otro sistema. | <ul style="list-style-type: none"> Mayor costo inicial: se duplican inversores, estructuras, cableado y protecciones. Más espacio requerido: se necesitan dos áreas soleadas. Mantenimiento doble: mayor número de componentes por revisar. |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> Menor costo en componentes: se reduce la cantidad de paneles, estructuras y se usa un solo inversor. Sistema compacto: instalación simplificada, menor uso de espacio y cableado. Control centralizado: con lógica de control adecuada, se puede alternar la operación o priorizar bombas. | <ul style="list-style-type: none"> Requiere dimensionamiento preciso: el inversor debe soportar la carga combinada de arranque y operación (o implementarse operación por turnos). Menor confiabilidad: si el inversor falla, ambas bombas quedan inoperativas. Menor flexibilidad: restricciones para operación simultánea si no hay sobredimensionamiento. |

4.2. SPIS con tanque elevado y distribución por gravedad

En esta configuración, la bomba sumergible alimentada por el sistema FV extrae el agua del pozo y la transporta directamente hacia un tanque elevado. Desde este punto, el agua se distribuye por gravedad al sistema de riego, eliminando la necesidad de una segunda bomba.

Al igual que en el caso del sistema SPIS con estanque intermedio y doble bombeo, la configuración puede incorporar bombas tanto de corriente directa (CD) como de corriente alterna (CA).

Un sistema de bombeo solar FV con tanque de almacenamiento es una de las configuraciones más utilizadas en riego agrícola, especialmente en zonas rurales sin acceso continuo a energía eléctrica. El uso de un tanque permite asegurar el acceso al agua durante días nublados o, como en este caso particular, ante condiciones de recarga lenta de pozos artesanales. Este tipo de solución aporta confiabilidad y cierta autonomía operativa, sin embargo, su implementación requiere considerar costos estructurales.

El tanque puede dimensionarse para cubrir entre uno y varios días de consumo, dependiendo de la disponibilidad de recursos, la variabilidad climática y las necesidades del cultivo. Idealmente, debe instalarse en un punto más alto que las salidas de agua, permitiendo la distribución por gravedad y evitando la necesidad de bombeo adicional. La altura del tanque debe diseñarse según el tipo de emisor utilizado, para asegurar una presión adecuada y una distribución uniforme del riego.

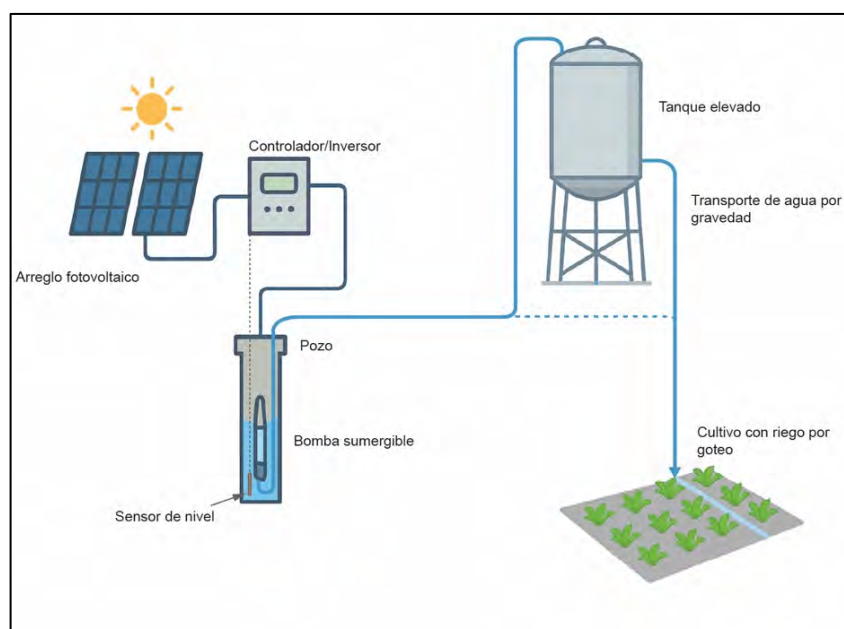


Figura 5. SPIS con tanque elevado y riego por gravedad.

En los sistemas de riego por goteo alimentados por gravedad, la altura del tanque de almacenamiento es un factor fundamental, ya que determina la presión disponible en el sistema. Una presión insuficiente puede provocar riego desuniforme o incluso el mal funcionamiento de los emisores. La relación básica a considerar es que cada metro de altura del nivel de agua genera aproximadamente 0.1 bar de presión.

La altura óptima del tanque dependerá principalmente del tipo de emisor utilizado. A continuación, se presenta un análisis de los requerimientos mínimos de altura para tres tipos comunes de emisores en riego por goteo: cintillas, goteros convencionales y goteros autocompensantes.

Tabla 9. Alturas mínimas de tanque elevados según tipo de emisor.

| Tipo de emisor | Presión de trabajo recomendada | Altura mínima del tanque (m) | Observaciones clave |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| Cintillas de riego | 0.4 – 0.6 bar | 4 – 6 m | Apta para cultivos de ciclo corto; funciona en líneas cortas con menor altura. |
| Goteros convencionales | 0.7 – 1.0 bar | 7 – 10 m | Requieren presión más estable; adecuados para cultivos perennes o sistemas durables. |
| Goteros auto compensantes | 1.0 – 1.5 bar | 10 – 15 m | Alta uniformidad; necesarios en terrenos irregulares o redes extensas. |

Si bien los tanques elevados ofrecen ventajas importantes en términos de autonomía y eficiencia del riego, su construcción representa una inversión considerable, especialmente cuando se requieren alturas superiores a 7 o 10 metros. La necesidad de estructuras resistentes (como torres metálicas, bases de concreto o soportes de madera tratada), además del costo del propio tanque, puede representar un desembolso significativo para pequeños productores con ingresos limitados y estacionales, altamente dependientes de los ciclos agrícolas.

Para los pequeños agricultores, cuya economía es limitada, la instalación de un sistema de riego con tanque elevado puede ser un obstáculo financiero importante, incluso si a largo plazo significa mejorar la productividad. En estos casos, es crucial evaluar opciones intermedias como sistemas de menor altura combinados con tecnología de baja presión, uso de la gravedad natural del terreno, o apoyo a través de programas de financiamiento rural para la construcción de esta infraestructura.

4.3. SPIS híbridos solar–red eléctrica

En Baja Verapaz, la cobertura eléctrica alcanza un 85 %; sin embargo, el servicio es frecuentemente inestable y costoso, especialmente durante la temporada seca. Ante este contexto, los sistemas híbridos que combinan energía solar y red eléctrica representan una alternativa funcional para asegurar la continuidad del riego agrícola.

Estos sistemas privilegian el uso de la energía solar durante el día y emplean la red eléctrica únicamente en las horas sin radiación solar o como fuente de respaldo. Esta estrategia permite reducir costos y optimizar la extracción de agua cuando el pozo dispone de un nivel suficiente, contribuyendo así a maximizar la disponibilidad hídrica posible dentro de las limitaciones de infraestructura del pozo.

Para asegurar un funcionamiento seguro y adaptado a los entornos rurales, se incorporan los siguientes componentes:

- **Inversor híbrido:** Permite la conexión tanto del sistema FV como de la red eléctrica. La selección de la fuente de energía se realiza manual o automáticamente, dependiendo de la sofisticación del sistema.
- **Sistema de desconexión manual:** Permite aislar completamente la red eléctrica cuando se opera exclusivamente con energía solar, aumentando la seguridad.

- Protección contra sobretensiones: Protege el sistema frente a fluctuaciones de voltaje, frecuentes en redes rurales con suministro inestable.

4.3.1. SPIS híbrido con estanque intermedio

Esta configuración combina un sistema FV y la red eléctrica mediante un inversor híbrido, que alimenta una bomba sumergible encargada de extraer agua del pozo y almacenarla en un estanque al nivel del suelo. Posteriormente, una bomba superficial o sumergible impulsa el agua hacia el sistema de riego.

Esta solución asegura la continuidad del riego incluso en condiciones de baja irradiación solar o durante cortes en la red eléctrica, gracias a la disponibilidad de dos fuentes energéticas complementarias. Asimismo, permite aprovechar los períodos de alta irradiación para almacenar agua cuando el pozo tiene nivel suficiente, y posibilita extraer agua en momentos sin sol pero con el pozo recargado y listo para bombear, lo que incrementa significativamente la flexibilidad operativa.

La Sección 4.1.2 para la Evaluación de configuración: Uno o dos arreglos FV para alimentar bombas de agua CA aplica en esta configuración.

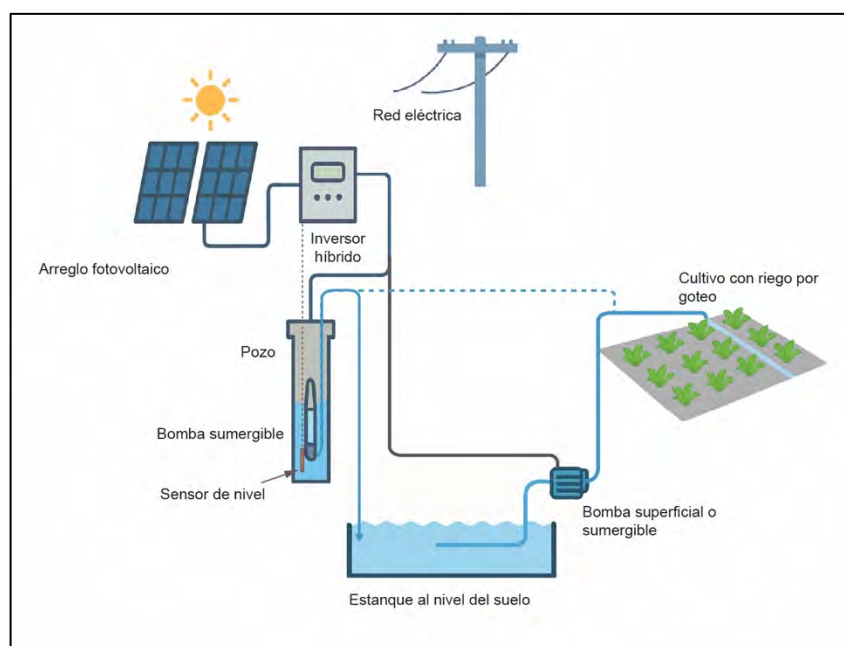


Figura 6. SPIS híbrido solar–red con estanque intermedio.

4.3.2. SPIS híbrido con tanque elevado

En esta variante, el sistema híbrido alimenta una bomba sumergible que extrae agua del pozo y la conduce hacia un tanque elevado, desde donde el agua se distribuye por gravedad al cultivo mediante riego por goteo.

Esta configuración simplifica la operación al eliminar la necesidad de rebombeo y resulta adecuada para zonas con acceso intermitente a la red eléctrica. Al almacenar agua durante las horas de sol y

permitir su distribución sin consumo adicional de energía, mejora la eficiencia y la autonomía del sistema.

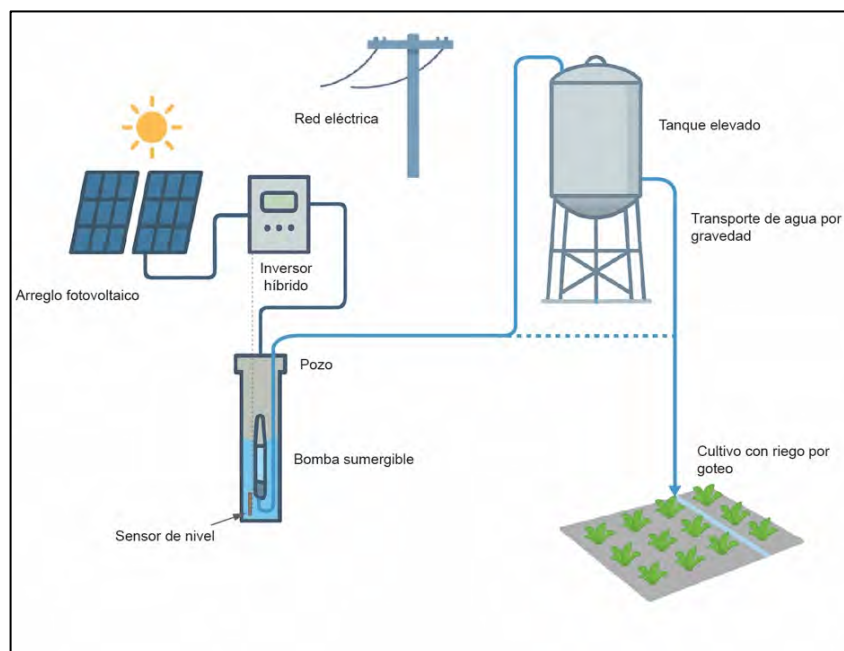


Figura 7. SPIS híbrido solar–red con tanque elevado.

4.4. Bombas para operación solar: consideraciones y criterios de selección

En el ámbito del bombeo con energía solar, a veces se asume que basta con acoplar un inversor a una bomba convencional. La experiencia de diseño y operación muestra que, salvo contextos muy específicos, esa solución puede elevar costos y riesgos frente a equipos concebidos para operación solar.

Dado el carácter intermitente de la irradiancia y la recarga lenta de los pozos, el uso de bombas convencionales de CA implica mayores picos de arranque, menor eficiencia y carencia de protecciones críticas, por lo que tienden a requerir sobredimensionamiento del arreglo FV y eleva el costo de ciclo de vida (LCC). Por ello, se priorizan bombas diseñadas para operación solar con protecciones de nivel y marcha en seco.

Razones principales:

1. Irradiancia variable: sin MPPT y control de velocidad, la entrega de energía fluctúa y puede generar paros intermitentes y menor rendimiento.
2. Picos de arranque: motores convencionales presentan corrientes iniciales altas, que obligan a sobredimensionar controlador y arreglo FV.

3. Protecciones operativas: no siempre incorporan marcha en seco, entradas de nivel y temporización, críticas en fuentes someras de recarga lenta.
4. Ajuste hidráulico: con abatimientos y CDT variables, se requieren sumergibles multietapa; las superficiales enfrentan límites de succión y cebado.
5. Eficiencia y LCC: menor eficiencia volumétrica implica más energía por m³ y mayor costo de ciclo de vida (paros, mantenimiento, repuestos).
6. Trazabilidad y garantías: los diseños se validan con curvas de bomba y controlador; combinaciones ad hoc complican garantías y la verificación técnica.

Por estas razones, el diseño prioriza bombas y controladores concebidos para operación solar (CD con controlador o CA con VFD y MPPT), manteniendo flexibilidad para equivalentes que preserven el objetivo de entrega técnica.

4.5. Soluciones de bombeo solar y energía para familias agricultoras fuera de la red

Este proyecto de bombeo solar para pequeños agricultores va más allá de garantizar el acceso al agua, ya que además busca ofrecer a las familias rurales la posibilidad de contar con electricidad asequible, limpia y confiable. El sistema prioriza el bombeo desde un pozo de recarga lenta, pero dado que la bomba solo puede operar unas pocas horas al día por las condiciones del pozo, la energía generada por el arreglo FV quedaría desaprovechada durante los periodos de inactividad. Para maximizar su uso, se propone integrar un Sistema Solar Domiciliario (SHS) que permita cubrir las necesidades básicas de energía de viviendas rurales off-grid, mejorando así la calidad de vida de las comunidades beneficiarias.

El sistema está diseñado para aprovechar la energía del sol, dando prioridad al bombeo de agua cuando el pozo lo permite y usando la energía sobrante para cubrir las necesidades básicas de la vivienda. Con controles y protecciones adecuados, la bomba funciona solo cuando hay sol suficiente y agua disponible, mientras se garantiza también la electricidad para los usos esenciales del hogar.

4.5.1. Configuración off-grid para bombeo de agua y SHS

El diseño propuesto sigue una arquitectura de “bomba primero”, en la cual el arreglo fotovoltaico único se destina en primera instancia al bombeo de agua, y únicamente la energía sobrante se dirige al almacenamiento en baterías para abastecer las cargas domésticas.

La energía generada por el arreglo FV se gestiona a través de un inversor híbrido con MPPT, que regula tanto la carga del banco de baterías como la entrega de energía en corriente alterna (CA). Desde la salida del inversor se alimentan dos circuitos:

- Circuito prioritario: conectado a un relé de control que habilita el variador de frecuencia (VFD) de la bomba solo cuando la generación solar es suficiente. El VFD recibe también las señales de los sensores de nivel en tanque y pozo, de manera que la bomba opera únicamente cuando se cumplen las condiciones de sol y disponibilidad de agua.

- Circuito secundario: destinado a las cargas domésticas de la vivienda (iluminación, radio, TV, refrigerador, etc.), que se alimentan del FV disponible y, en caso necesario, de la energía almacenada en las baterías hasta un nivel de descarga permitido.

El banco de baterías se concibe como un complemento: almacena únicamente la energía sobrante y no alimenta la bomba. Su función es asegurar que las familias puedan contar con electricidad básica durante las horas sin sol, manteniendo el uso eficiente del arreglo fotovoltaico durante todo el día.

Para garantizar la operación confiable, el sistema integra protecciones eléctricas y lógicas de control, incluyendo rampas de arranque en el VFD, tiempos mínimos entre arranques (anti-ciclado) y protecciones contra sobrecarga, pozo seco y sobretensiones. Con esta configuración, se asegura que la bomba funcione en condiciones óptimas y que, al mismo tiempo, las familias agricultoras fuera de la red dispongan de electricidad asequible, limpia y confiable.

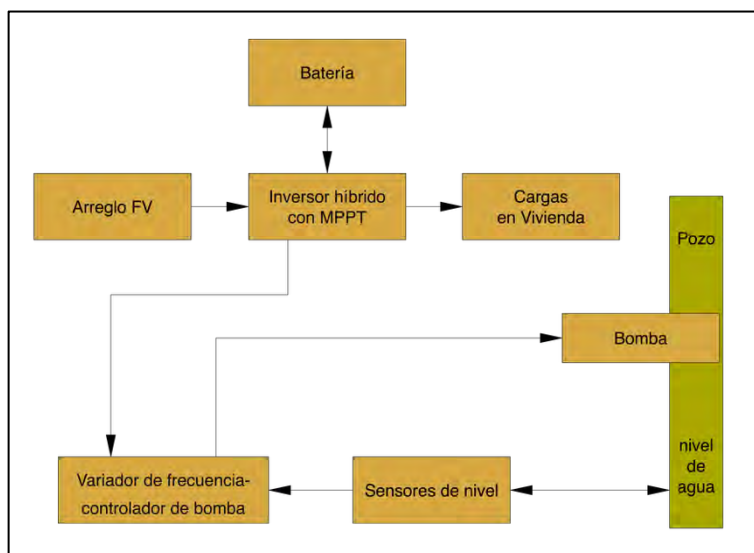


Figura 8. Solución de bombeo de agua y acceso a energía para pequeños agricultores fuera de la red.

4.5.2. Configuración on-grid para bombeo de agua y acceso a energía

El sistema está diseñado para dar prioridad al bombeo de agua y, al mismo tiempo, garantizar el suministro de electricidad a las viviendas rurales, utilizando la red únicamente como respaldo de último recurso, debido a su inestabilidad y alto costo.

1. Arreglo fotovoltaico (PV array)
 - Genera energía en corriente continua (CC) y la entrega al inversor híbrido con MPPT.
2. Inversor híbrido con MPPT (con entrada AC-IN de red y salida AC-OUT aislable)
 - Es el equipo central que gestiona la entrada solar, la carga/descarga de la batería y el suministro de energía en corriente alterna (CA) hacia las cargas.

- Está conectado a la red eléctrica (AC-IN) como fuente de respaldo, configurado con cero exportación.
 - Proporciona energía estable tanto a las cargas domésticas como al circuito de bombeo.
3. Batería
- Almacena el excedente solar para cubrir la demanda durante la noche o en ausencia de sol.
 - Se utiliza únicamente para abastecer las cargas domésticas (nunca a la bomba), garantizando servicios básicos de electricidad a las familias.
4. Cargas domésticas en CA
- Reciben energía directamente del inversor híbrido, prioritariamente desde el FV y, en segundo lugar, desde la batería.
 - La red se utiliza únicamente cuando FV y batería no son suficientes.
5. Bomba como carga prioritaria
- La salida CA del inversor alimenta al variador de frecuencia (VFD) – controlador de bomba, que a su vez entrega energía a la bomba sumergible en CA.
 - El VFD permite arranques suaves, protege contra sobrecargas y posibilita un control avanzado del bombeo.
 - Los sensores de nivel (tanque lleno/vacío y pozo seco) están conectados al VFD, asegurando que la bomba funcione únicamente cuando haya suficiente generación solar y disponibilidad de agua en el pozo.
6. Red eléctrica
- Catalogada como inestable y costosa, se utiliza únicamente como último recurso.
 - El inversor híbrido bloquea la exportación de energía, cumpliendo con la operación en modo sin inyección a la red.

Lógica de operación

- Prioridad 1: el FV alimenta la bomba (a través del VFD) siempre que se cumplan las condiciones de operación.
- Prioridad 2: el FV abastece las cargas domésticas y carga la batería con el excedente.
- Prioridad 3: durante la noche o baja irradiancia, la batería respalda las cargas domésticas.
- Último recurso: la red eléctrica abastece solo si el FV y la batería no alcanzan para cubrir la demanda.

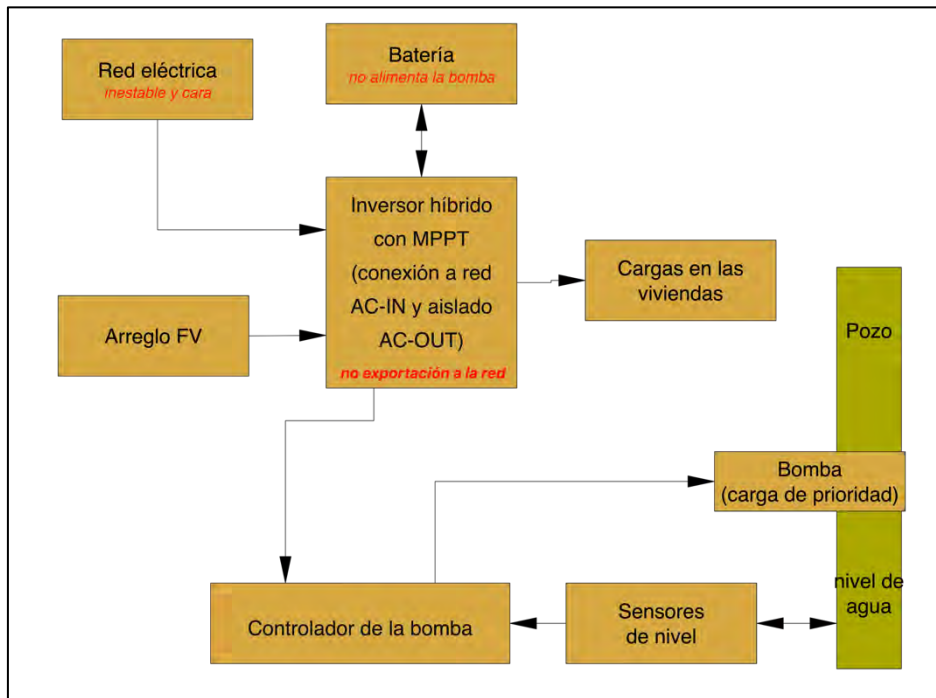


Figura 9. Solución de bombeo de agua y acceso a energía para pequeños agricultores conectados a una red eléctrica inestable y costosa .

5. Dimensionamiento del bombeo y arreglo FV

La metodología de diseño de los SPIS se apoya en los conceptos técnicos desarrollados en el Capítulo 2 e integra la determinación de la demanda de agua para el dimensionamiento del sistema de bombeo. Los sistemas deben satisfacer la demanda real de agua de los cultivos prevalentes de mayor consumo y en las condiciones hidráulicas de extracción identificadas en campo.

El objetivo del dimensionamiento fue garantizar sistemas técnicamente viables, energéticamente eficientes y adecuados a la capacidad de los pozos existentes, evitando tanto el sobredimensionamiento como configuraciones que comprometan la sostenibilidad operativa.

5.1. Evaluación de requerimientos para el diseño del sistema de bombeo

Para diseñar adecuadamente el sistema, se requiere información detallada sobre la demanda de agua, las condiciones del sitio y los recursos disponibles. La evaluación general indica lo siguiente:

- ✓ Demanda de agua:
 - ✓ consumo diario
 - ✓ ciclo de cultivo
- ✓ Fuente de agua:
 - ✓ Tipo de fuente: Pozos artesanales
 - ✗ Profundidad no suficiente
 - ✗ Caudal disponible no suficiente
- ✓ Ubicación y topografía:
 - ✓ cambios de elevación
 - ✓ distancias entre componentes
- ✓ Recurso solar adecuado
 - ✓ Mes de diseño crítico
- ✓ Requerimientos de almacenamiento:
 - ✓ Patrones de consumo conocidos
 - ✗ Disponibilidad de agua
- ✓ Equipamiento preexistente reutilizable
 - ✓ Bombas eléctricas más comúnmente 1 HP Trupper
 - ✓ Tuberías 2 pulgadas
 - ✓ Estanques excavados con o sin recubrimiento
- ✓ Acceso a fuentes de energía:
 - ✗ Sistemas híbridos como solar con baterías son costosos, requieren alto mantenimiento con un impacto ambiental alto
 - ✗ Conexión a la red eléctrica es inestable y costosa para los pequeños productores

Donde:

- ✓ Indica que la información está disponible

× Señala que la infraestructura existente no es adecuada, la condición no es suficiente, o no es una opción técnicamente o económicamente no adecuada.

Con esta información en mano, se puede seleccionar una configuración de sistema adecuada.

5.1. Configuración óptima para Rabinal y San Miguel Chicaj: SPIS híbrido con estanque intermedio y doble bombeo

A partir de la evaluación en campo, que incluyó el análisis de la infraestructura existente y las condiciones socioeconómicas de los pequeños productores, fuertemente afectados por los impactos del cambio climático en sus cultivos, este estudio determinó la necesidad de mejorar los sistemas actuales e implementar una configuración de SPIS híbridos con bombeo en dos etapas y estanque intermedio. Esta solución permite mayor flexibilidad y adaptabilidad frente a las limitaciones hidrogeológicas y estructurales observadas.

Por un lado, se constató que la mayoría de los pozos artesanales presentan bajas tasas de recarga, lo que restringe su capacidad para mantener caudales constantes durante periodos prolongados. Por otro lado, la infraestructura de almacenamiento predominante está conformada por estanques a nivel del suelo, sin la elevación necesaria para permitir la distribución del agua por gravedad, lo que obliga a considerar una segunda etapa de bombeo para garantizar un suministro eficiente al sistema de riego.

Se ha identificado que la red eléctrica disponible presenta problemas de estabilidad y tarifas elevadas, lo cual la convierte en una fuente poco confiable y económicamente desfavorable para alimentar de forma continua el sistema de bombeo de agua.

Por esta razón, el sistema ha sido diseñado para funcionar principalmente con energía solar, mediante un arreglo FV dimensionado para cubrir la demanda energética del bombeo durante todo el año. La conexión a la red eléctrica se contempla únicamente como respaldo, siempre que exista acceso a ella, y solo se activará en situaciones excepcionales, como periodos prolongados de baja radiación solar o fallos en el sistema fotovoltaico.

El esquema híbrido propuesto, solar como fuente principal y red como apoyo, permite combinar la eficiencia de la energía renovable con la seguridad de contar con un respaldo energético cuando sea necesario. Esta solución técnica presenta los siguientes beneficios concretos:

- Reducción de costos operativos
- Mayor continuidad del servicio
- Uso eficiente de los recursos disponibles

El sistema está concebido para operar de forma autónoma mediante energía solar, asegurando eficiencia y sostenibilidad, mientras que la red eléctrica cumple un rol secundario y estratégico para mantener la continuidad del servicio en situaciones puntuales.

5.2. Dimensionamiento de bombeo

El dimensionamiento de la bomba en un sistema de bombeo solar para riego se basa principalmente en dos criterios interrelacionados:

1. La demanda diaria promedio de agua del cultivo
 - a. La demanda diaria estimada para el maíz (cultivo de referencia) en una parcela típica de media manzana (≈ 0.35 ha) es de aproximadamente $14 \text{ m}^3/\text{día}$. (Tabla 3)
 - b. Dado que el maíz requiere riego cada tres días en temporada seca, el sistema debe contar con un volumen de almacenamiento suficiente para cubrir al menos 3 días de riego, es decir, alrededor de 42 m^3 de agua disponible.
 - c. Este enfoque asegura que, incluso cuando el pozo no pueda operar continuamente por su lenta recarga, exista agua suficiente para mantener la continuidad del riego.
2. La carga dinámica total (CDT) del sistema, que depende de la profundidad del pozo, la distancia horizontal y las pérdidas por fricción.

5.2.1. Cálculo del caudal para riego eficiente de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz en temporada seca

En lugar de calcular un caudal promedio a lo largo de todo el ciclo del cultivo, se optó por dimensionar el sistema en función de la etapa de mayor demanda hídrica. Esta estrategia permite asegurar el abastecimiento de agua en el momento más exigente, incluso si el pozo tiene una baja tasa de recuperación.

Para la determinación del caudal se asumió que el pozo puede proveer toda el agua que se necesita para los días típicos más secos (febrero-marzo-abril) aunque ya se reconoció que los pozos no han sido aforados y que son de baja recarga. El caudal se calculó con base en la demanda diaria promedio durante la etapa de mayor demanda (desarrollo vegetativo y floración/fructificación) y el tiempo disponible para operar la bomba durante las horas solares útiles (PSH). **La demanda incluye un factor de seguridad del 10 %, con el fin de compensar el impacto del cambio climático.**

Ecuación 3

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Demanda de agua diaria}}{\text{PSH} \times \text{Eficiencia de riego por goteo}}$$

$$\text{Caudal} = \frac{14 \text{ m}^3}{5 \text{ PSH} \times 0.9} = 3.1 \text{ m}^3/\text{h} = 51.7 \text{ L}/\text{min}$$

5.2.2. Cálculo de la Carga Dinámica Total (CDT)

El cálculo de la CDT es un componente clave en el dimensionamiento de sistemas de bombeo solar, ya que determina la energía necesaria para elevar el agua desde la fuente hasta el punto de

almacenamiento o distribución. En este proyecto, se distinguen dos CDT, correspondientes a cada etapa del sistema:

- Carga Dinámica Total 1 (CDT1): Desde el pozo al estanque de almacenamiento
- Carga Dinámica Total 2 (CDT2): Desde el estanque al cultivo con riego por goteo

En este diseño se calcularon las CDT por separado y los respectivos dimensionamientos de bomba y arreglo FV. Los diseños completos será la integración de ambos análisis.

5.2.2.1. Carga Dinámica Total 1

El cálculo de la Carga Dinámica Total 1 (CDT1) corresponde a la primera etapa del sistema, en la que una bomba sumergible extrae agua del pozo y la impulsa hasta el almacenamiento. Esta carga se estima considerando los siguientes elementos:

- La profundidad del pozo y el nivel dinámico del agua durante el bombeo
- La altura vertical desde el nivel freático hasta el tanque
- La distancia horizontal entre el pozo y el estanque
- Las pérdidas por fricción en las tuberías

Este estudio considera cuatro escenarios de CDT1 (20, 30, 40 y 50 m), debido a que los pozos artesanales no han sido aforados y que, en general, sus condiciones físicas distan de ser óptimas. Este enfoque permite desarrollar diseños flexibles que puedan adaptarse tanto a las condiciones actuales como a posibles mejoras en la infraestructura.

En la mayoría de los casos:

- En la mayoría de los casos evaluados la distancia horizontal entre el pozo y el punto de descarga en el estanque de almacenamiento es inferior a 50 m, lo cual implica pérdidas por fricción mínimas, menores a 1 m.
- El almacenamiento se realiza a nivel del suelo, por lo que la altura de descarga adicional es nula.

Bajo estas condiciones, la profundidad del pozo y el nivel dinámico constituyen los factores predominantes en el cálculo de la CDT. Además, las bombas pueden operar de manera eficiente dentro de un rango amplio de CDT, lo que hace técnicamente viable esta propuesta de múltiples diseños. Esto permite ajustar la selección del equipo a las condiciones reales de cada sitio, manteniendo un rendimiento eficiente y sostenible.

Como resultado, este informe presenta más de tres diseños de SPIS. Los diseños responden a los cuatro CDT1 aquí contemplados, y al combinarse posteriormente a las opciones de CDT2, presentadas en la siguiente sección, se obtienen ocho diseños integrados que reflejan de manera realista las condiciones de infraestructura y socioeconómicas de los pequeños productores de la región.

5.2.2.2. Carga Dinámica Total 2

La segunda etapa del sistema implica el impulso del agua desde el estanque de almacenamiento hacia el área de cultivo, utilizando una bomba superficial y un sistema de riego por goteo. Esta configuración

responde principalmente a consideraciones económicas, ya que la construcción de estanques elevados o estructuras de almacenamiento en altura representa un costo adicional significativo para los agricultores. Por lo tanto, el diseño aquí presentado considera una solución técnicamente viable que permite aprovechar la infraestructura existente de bajo costo, sin necesidad de modificaciones estructurales mayores y manteniendo plenamente la funcionalidad del sistema.

El diseño de esta segunda etapa se orienta a garantizar que la bomba superficial proporcione el caudal y la presión adecuados para el funcionamiento del sistema de riego, considerando factores como la topografía, la distancia entre el estanque y el cultivo y la geometría hidráulica del sistema. Esta configuración también permite un mejor control del agua aplicada, optimizando la operación durante los horarios de riego.

El dimensionamiento de bomba y arreglo FV para esta etapa se realizó considerando dos escenarios de caudales, con el objetivo de analizar si es económicamente viable reducir el tiempo de riego mediante un aumento moderado de caudal.

- El caudal base, utilizado también para el diseño de la extracción desde el pozo.
- El caudal base multiplicado por 1.5, como alternativa de mayor capacidad.

Estas dos opciones de CDT2 reflejan de forma realista la diversidad de condiciones infraestructurales y socioeconómicas presentes entre los pequeños agricultores de la región, permitiendo adaptar el sistema a diferentes niveles de inversión y necesidades operativas.

5.3. Herramienta metodológica: *SPIS Toolbox*

Para el presente estudio, se ha adoptado la *SPIS Toolbox* (Toolbox on Solar Powered Irrigation Systems) como herramienta principal de análisis y diseño del sistema de riego por bombeo solar. Esta plataforma, desarrollada por GIZ en colaboración con la FAO y disponible públicamente a través de energypedia.info, ofrece un enfoque integral y estructurado para la evaluación, planificación y dimensionamiento de soluciones de riego solar adaptadas a contextos agrícolas diversos.

La *SPIS Toolbox* agrupa una serie de módulos temáticos y herramientas prácticas, como hojas de cálculo, listas de verificación y guías técnicas, que permiten abordar aspectos clave como:

- El análisis de requerimientos hídricos y energéticos,
- La caracterización del sitio y del recurso hídrico,
- La selección y dimensionamiento del sistema FV y de bombeo,
- Y la evaluación financiera de las alternativas propuestas.

Su aplicación en este estudio tiene como objetivo asegurar un diseño técnicamente viable, económicamente sostenible y ambientalmente responsable, tomando en cuenta las condiciones específicas del sitio y las capacidades de los usuarios locales.

Parámetros de entrada

Entre las herramientas empleadas se encuentra el módulo de estimación de la Carga Dinámica Total (TDH en la herramienta), que permite integrar parámetros técnicos conocidos como la irradiación

solar promedio, la demanda diaria de agua ajustada por eficiencia de riego, las características de las tuberías (diámetro, longitud, material), así como las profundidades y distancias de bombeo observadas en campo.

Estimación de pérdidas por fricción

La *SPIS Toolbox* incluye una hoja especializada para la estimación de pérdidas por fricción en las tuberías, las cuales son esenciales para calcular con precisión la CDT. La metodología utilizada se basa en fórmulas hidráulicas reconocidas, como la ecuación de Darcy-Weisbach, que considera el caudal, la rugosidad del material, el diámetro de la tubería y la velocidad del flujo. La herramienta ofrece tanto un método iterativo como una aproximación simplificada. En este estudio se utilizó la aproximación, que es adecuada para etapas de pre-dimensionamiento y genera resultados representativos con menor complejidad.

5.4. Cuatro diseños FV para el riego de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz

5.4.1. Etapa 1: Diseños FV para la extracción de agua subterránea y dirigirla al estanque intermedio

Paso 1: Información de entrada

El siguiente cuadro es un extracto de la herramienta *SPIS Toolbox*, específicamente del módulo de dimensionamiento hidráulico y energético, en el cual se integran los datos técnicos disponibles del sitio. Esta información constituye la base para calcular la CDT, estimar las pérdidas por fricción en las tuberías, y finalmente dimensionar tanto la bomba como el arreglo FV requerido.

En esta herramienta se han introducido los parámetros conocidos del sitio, incluyendo la radiación solar promedio diaria (5.0 kWh/m²), la demanda hídrica del cultivo de maíz (14 m³/día para 0.35 ha (0.5 mz)), el diámetro de tubería (2 pulgadas), así como las distancias horizontales y profundidades máximas observadas en campo. Para efectos de dimensionamiento hidráulico, la demanda de 14 m³/día se ajustó a 15.5 m³/día para compensar la eficiencia del sistema de riego por goteo, estimada en 90 %, asegurando así que el volumen efectivamente entregado a las plantas sea el requerido agronómicamente.

Aunque los pozos artesanales no han sido aforados, se ha introducido un caudal de referencia que permita el cálculo para realizar un dimensionamiento orientado a la planificación financiera y técnica del proyecto. Esta suposición permite explorar soluciones viables en el corto plazo, sin descartar posibles mejoras futuras en la infraestructura de captación de agua.

SPIS 1: Información de entrada para el dimensionamiento de riego por goteo de 0.35 ha (0.5 mz) de un cultivo de maíz.

| Supuestos básicos | | |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² |
| Reducción solar (pérdidas): | 25 | % |
| Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | |
| Rendimiento estimado fuente de agua: | 5.0 | m ³ /hora |
| Extracción sostenible fuente de agua: | 75% | /hora |
| Tasa diaria de bombeo de agua: | 15.5 | m ³ /día |
| Diámetro tubería: | 2 | pulgada |
| Longitud tubería: | 50.0 | m |
| Material de la tubería de la bomba: | PVC, drawn tubing, glass | |

Paso 2: Cálculo de las CDT para los cuatro escenarios

SPIS 2: Cálculo de la CDT1 para cuatro niveles estáticos de agua 20, 30, 40 y 50 m para una longitud horizontal de tubería de 50 m.

| Determinación de la carga de bombeo | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-----|
| TDH | Carga dinámica total | 20.23 | 30.23 | 40.23 | 50.23 | m |
| H_s | Nivel estático del agua (para bombas sumergibles) o altura de aspiración (para bombas de superficie) | 20.00 | 30.00 | 40.00 | 50.00 | m |
| D | Abatimiento | | | | | m |
| H_e | Diferencia de altura entre el pozo y el soporte del tanque (o el área bajo riego con suministro directo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_i | Altura de la boquilla de entrada del tanque desde el suelo | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_o | Altura de salida del tanque (conexión con el área bajo riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_l | Pérdida de carga en tubería | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | m |
| H_n | Pérdida de carga en conectores (de "INPUT_Pérdida de presión bombeo") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{n-irr} | Pérdida de presión en el sistema de riego (de "INPUT_Pérdida de presión riego") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_m | Pérdida de carga en Caudalímetro | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_f | Pérdida de carga en filtro/fertirrigación | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{irr} | Sistema de riego a presión (de "Presión necesaria para plan de riego" and Pérdida de presión riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| | Presión necesaria para plan de riego (véase la tabla de referencia debajo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | bar |

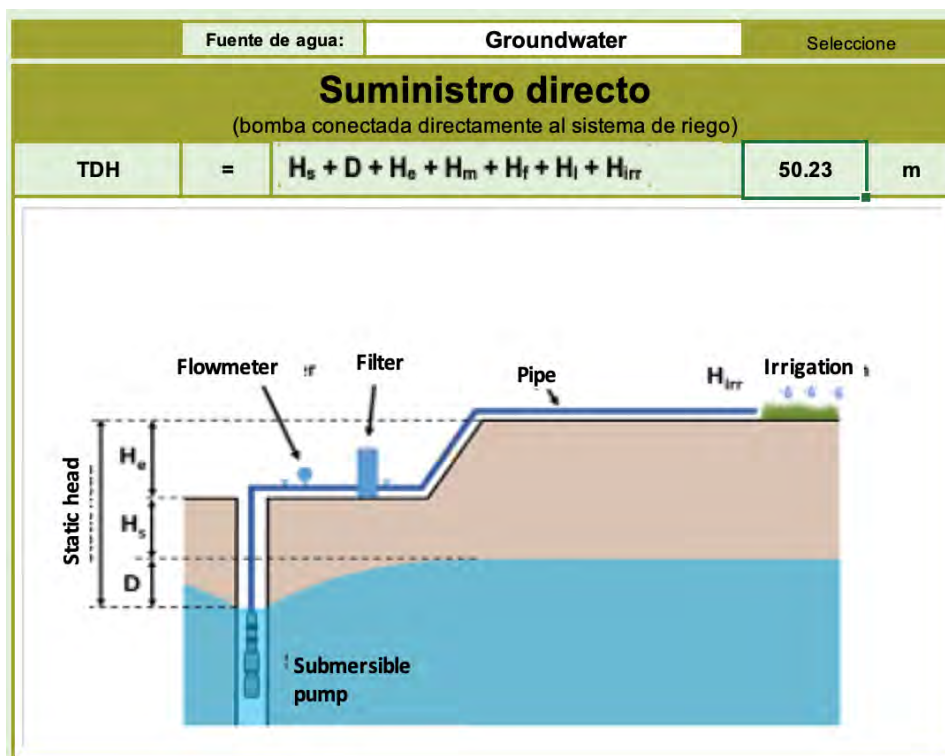
En caso de que la longitud de la tubería alcanzara los 100 metros, la Carga Dinámica Total 1 (CDT1) no se vería significativamente afectada, ya que el desplazamiento horizontal del agua genera pérdidas mínimas en comparación con las asociadas a la elevación vertical, tal y como se muestra en el siguiente recuadro.

SPIS 3: Cálculo de la CDT1 para cuatro niveles estáticos de agua 20, 30, 40 y 50 m para una longitud horizontal de tubería de 100 m.

| Determinación de la carga de bombeo | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-----|
| TDH | Carga dinámica total | 20.45 | 30.45 | 40.45 | 50.45 | m |
| H_s | Nivel estático del agua (para bombas sumergibles) o altura de aspiración (para bombas de superficie) | 20.00 | 30.00 | 40.00 | 50.00 | m |
| D | Abatimiento | | | | | m |
| H_e | Diferencia de altura entre el pozo y el soporte del tanque (o el área bajo riego con suministro directo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_i | Altura de la boquilla de entrada del tanque desde el suelo | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_o | Altura de salida del tanque (conexión con el área bajo riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_l | Pérdida de carga en tubería | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | m |
| H_n | Pérdida de carga en conectores (de "INPUT_Pérdida de presión bombeo") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{n-irr} | Pérdida de presión en el sistema de riego (de "INPUT_Pérdida de presión riego") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_m | Pérdida de carga en Caudalímetro | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_f | Pérdida de carga en filtro/fertirrigación | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{irr} | Sistema de riego a presión (de "Presión necesaria para plan de riego" and Pérdida de presión riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| | Presión necesaria para plan de riego (véase la tabla de referencia debajo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | bar |

Por lo tanto, el diseño se hará con una distancia de 50 m de tubería desde la bomba hasta el estanque de almacenamiento.

SPIS 4: Esquema de la CDT1 para el nivel estático de agua de 50 m para una longitud horizontal de tubería de 50 m.



Paso 1. Potencia requerida (Dimensionamiento de la bomba)

Con la demanda de agua y la cuatro CDT ya determinadas, el siguiente paso en el dimensionamiento del sistema consiste en calcular la potencia eléctrica que debe suministrarse al motor de la bomba. Este valor es esencial para identificar una bomba adecuada al caudal deseado y a las condiciones hidráulicas específicas del sitio.

El *SPIS toolbox* cuenta con una base de datos de bombas en el mercado, de las cuales escoge para proponer un rango de potencias para bombas y la superficie solar FV necesaria para energizar la bomba. La base de datos no necesariamente tiene todas las bombas existentes en el mercado. Por lo tanto, **para no sobreestimar los requerimientos de bombeo como parte de este trabajo, se ha agregado información de salida en el toolbox, para tener otra referencia que ayude al diseñador seleccionar la tecnología.** La información añadida es la siguiente:

1. Se agregó la capacidad del arreglo FV necesario para energizar las propuestas del *SPIS Toolbox*
2. Se realizó el cálculo de la potencia de la bomba la cual se fundamenta en los principios físicos que rigen el movimiento del agua contra una altura determinada. Esta estimación permite acotar la selección del equipo de bombeo y, además, sirve como punto de partida para proyectar la capacidad necesaria del sistema fotovoltaico, lo cual es crucial para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

3. Se estimó la capacidad del arreglo FV para el requerimiento de energía de la bomba propuesta.

Ecuación 4

$$\text{Potencia}_{\text{motor-bomba}}(W) = \frac{\text{CDT (m)} \times \text{Caudal (l/s)} \times 9.81}{\eta_{\text{motor-bomba}}}$$

Ecuación 5

$$\text{Tamaño del Arreglo FV (W)} = \frac{\text{Potencia}_{\text{motor-bomba}}(W)}{(1 - \text{Eficiencia del Sistema})}$$

El cálculo directo de la potencia requerida, complementario a los rangos sugeridos por el *SPIS Toolbox*, permite realizar una estimación preliminar ajustada a las condiciones reales del sitio. Esta información es clave no solo para estimar el tamaño del arreglo FV que será necesario, sino sobre todo para orientar la selección de tecnologías de bombeo que estén disponibles en el mercado guatemalteco. Además, brinda una referencia temprana de costos útil para la planificación. Los diseños definitivos se elaborarán a partir de las curvas de desempeño de las bombas seleccionadas, provistas por el proveedor-instalador solar.


Este enfoque permite alinear el diseño del sistema con la oferta local de equipos y facilita la integración con la infraestructura existente, lo que reduce costos de implementación, simplifica el mantenimiento y aumenta la probabilidad de adopción por parte de los usuarios. Al trabajar con valores técnicos realistas, se pueden proponer soluciones concretas que aprovechen lo que ya tienen los productores, adaptando el sistema solar para complementar y optimizar el uso de las tecnologías disponibles.

SPIS 5: Diseños de bombeo solar desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de diseños para CDT de 20 y 30 m.

OUTPUT_ Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 15.5 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 3.10 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 20.23 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |



| | | | |
|--|--------------------------|---|------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.5 kWp | a | 0.6 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 0.7 HP | a | 0.8 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 3.3 m² | a | 4 m² |

TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: **0.63 kWp** to **0.75 kWp**

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity


| | |
|----------------|----------------|
| P puming (kW): | 0.28 kW |
| P puming (HP): | 0.38 HP |
| Volume flow: | 0.86 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |

| | |
|-----------------------|-----------------|
| PV Array Size: | 0.38 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

OUTPUT_ Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 15.5 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 3.10 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 30.23 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |



| | | | |
|--|--------------------------|---|--------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.7 kWp | a | 0.8 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 0.9 HP | a | 1.1 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 4.7 m² | a | 5.3 m² |

TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: **0.88 kWp** to **1 kWp**

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|----------------|----------------|
| P puming (kW): | 0.43 kW |
| P puming (HP): | 0.57 HP |
| Volume flow: | 0.86 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |

| | |
|-----------------------|-----------------|
| PV Array Size: | 0.57 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

SPIS 6: Diseño de bombeo solar desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de diseños para CDT para 40 y 50 m.

OUTPUT_ Resultados

Tank system

(Seleccione)

| | | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|--|
| Necesidades de agua: | 15.5 | m ³ /día | |
| Volumen de flujo: | 3.10 | m ³ /h | |
| Carga dinámica total: | 40.23 | m | |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² | |

| | | | |
|--|--------------------------|----|------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.8 kWp | a | 1.05 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 1.1 HP | a | 1.4 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 5.3 m² | a | 7 m² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 1 kWp | to | 1.31 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|------------------------|-----------------|
| P pumping (kW): | 0.57 kW |
| P pumping (HP): | 0.76 HP |
| Volume flow: | 0.86 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 0.75 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

OUTPUT_ Resultados

Tank system

(Seleccione)

| | | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|--|
| Necesidades de agua: | 15.5 | m ³ /día | |
| Volumen de flujo: | 3.10 | m ³ /h | |
| Carga dinámica total: | 50.23 | m | |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² | |

| | | | |
|--|------------------------|----|------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 1.05 kWp | a | 1.35 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 1.4 HP | a | 1.8 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 7 m² | a | 9 m² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 1.31 kWp | to | 1.69 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|------------------------|-----------------|
| P pumping (kW): | 0.71 kW |
| P pumping (HP): | 0.95 HP |
| Volume flow: | 0.86 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 0.94 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

5.4.2. Etapa 2: Diseños FV para llevar agua desde el estanque al cultivo con riego por goteo

Una vez almacenada el agua en el estanque, se requiere una segunda etapa de bombeo para llevarla hasta el cultivo mediante un sistema de riego por goteo, con el fin de aplicar el agua de manera eficiente y localizada.

A diferencia de la primera etapa, donde la energía requerida está dominada por la elevación vertical desde el pozo, en esta segunda etapa se prioriza el control de presión dentro del sistema de riego para garantizar la entrega uniforme de agua a lo largo de la parcela. Esto implica considerar no solo la altura desde el estanque al cultivo, sino también las pérdidas por fricción en la red de distribución y, sobre todo, la presión mínima operativa de los emisores, que suele estar entre 1 y 1.5 bar (equivalente a 10–15 metros de columna de agua).

Para el diseño de esta etapa, se utilizó nuevamente la *SPIS Toolbox*, incorporando los siguientes parámetros:

- Volumen de agua diario requerido: 15.5 m³/día por el cultivo de maíz en 0.35 ha (0.5 mz) en la temporada seca.
- Se dimensionó para dos caudales:
 - 3.1 m³/h (0.86 L/s) el caudal utilizado para la extracción en la sección
 - 3.1 m³/h x 1.5 con el fin de investigar si es económicamente factible reducir el tiempo de riego.
- Altura de succión desde el nivel del agua en el estanque: ≤ 1.5 m
- Presión requerida para el riego por goteo: 1.5 bar (~15 m de altura)

Se asume el uso de una bomba superficial, alimentada directamente por el sistema FV. El *SPIS toolbox* propone el rango de potencias de bomba, determinado mediante una revisión de su base de datos. Una vez más, el consultor estima la potencia requerida mediante la Ecuación 4 considerando ahora la CDT2, compuesta principalmente por la presión de trabajo del sistema de goteo más las pérdidas menores por fricción. Con base en esta potencia, se estimó el arreglo solar adicional necesario para operar la segunda bomba.

El uso de riego por goteo permite mejorar significativamente la eficiencia en el uso del agua, y al mismo tiempo reduce los requerimientos energéticos si se diseña adecuadamente. Esta solución, además de técnica y económicamente viable, es adaptable al contexto de los agricultores locales y puede ser escalable para otros cultivos o superficies mayores.

Paso 2: Información de entrada para el dimensionamiento del bombeo desde estanque de almacenamiento hasta el cultivo de maíz en 0.35 ha (0.5 mz).

SPIS 7: Información de entrada para el dimensionamiento del bombeo desde estanque de almacenamiento. Riego de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz.

| Supuestos básicos | | | Supuestos básicos | | |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² | Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² |
| Reducción solar (pérdidas): | 25 | % | Reducción solar (pérdidas): | 25 | % |
| Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | | Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | |
| Rendimiento estimado fuente de agua: | 10.0 | m ³ /hora | Rendimiento estimado fuente de agua: | 10.0 | m ³ /hora |
| Extracción sostenible fuente de agua: | 75% | /hora | Extracción sostenible fuente de agua: | 75% | /hora |
| Tasa diaria de bombeo de agua: | 15.5 | m ³ /día | Tasa diaria de bombeo de agua: | 23.3 | m ³ /día |
| Diámetro tubería: | 2 | pulgada | Diámetro tubería: | 2 | pulgada |
| Longitud tubería: | 50.0 | m | Longitud tubería: | 50.0 | m |
| Material de la tubería de la bomba: | PVC, tubo estirado, vidrio | | Material de la tubería de la bomba: | PVC, tubo estirado, vidrio | |

Paso 3. Cálculo de la CDT2 para dos caudales con una longitud de tubería de 2 pulgadas de 50 m.

La CDT2 considera los siguientes elementos:

- La altura geométrica entre el nivel del agua en el estanque (profundidad máxima de 1.5 m) y la tubería principal de riego
- La distancia horizontal de tubería laterales hasta el punto más alejado del cultivo
- Las pérdidas por fricción en las tuberías principales y laterales,
- Y la presión mínima requerida en los emisores del sistema de riego por goteo, generalmente entre 1 y 1.5 bar (10 a 15 metros de columna de agua).

SPIS 8: Presión necesaria por tipo de riego.

| Estimación de presión necesaria (bar) | |
|---------------------------------------|-------|
| Pivote | 1-3 |
| Goteo | 0.5-3 |
| Microaspersor | 0.5-2 |
| Aspersor | 2-5 |
| Cañón Viajero | 2-8 |
| Inundación | 0 |

Sistema de riego por goteo para 0.35 ha (0.5 mz) de maíz

Para el diseño del sistema de riego por goteo en una parcela de 0.35 ha (0.5 mz, 3,500 m²) de cultivo de maíz, se ha considerado un espaciamiento entre surcos de 0.8 m, una práctica comúnmente utilizada para este cultivo. Con esta disposición, se requieren aproximadamente 110 surcos, y por tanto, 110 líneas laterales (cintillas de riego), ya que cada surco debe contar con su respectiva línea de distribución.

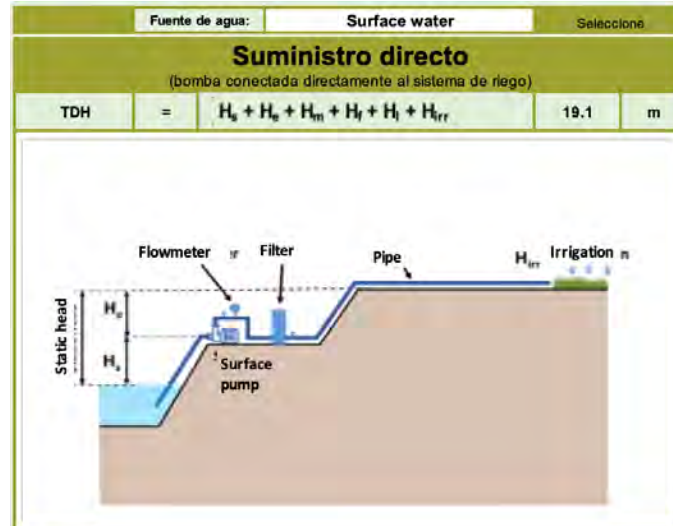
Dado que las cintillas desechables de bajo costo no deben superar los 40 m de longitud para evitar caídas significativas de presión y asegurar una distribución uniforme del agua, la parcela se dividió en cuatro subzonas de riego. Cada subzona opera con aproximadamente 28 cintillas de 40 m, conectadas en paralelo, lo cual permite mantener la eficiencia hidráulica del sistema.

Esta estrategia permite regar una subzona a la vez, facilitando el control del caudal, reduciendo la presión requerida y optimizando el uso de materiales disponibles localmente. Además, responde tanto a criterios técnicos como económicos, asegurando un diseño viable y accesible para los pequeños productores.

SPIS 9: Carga dinámica total para dos escenarios de caudales.

| Determinación de la carga de bombeo | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------|------------------------|-----|
| | | 3.1 m ³ /h | 4.65 m ³ /h | |
| TDH | Carga dinámica total | 16.31 | 19.14 | m |
| H_s | Nivel estático del agua (para bombas sumergibles) o altura de aspiración (para bombas de superficie) | 1.50 | 1.50 | m |
| D | Abatimiento | | | m |
| H_e | Diferencia de altura entre el pozo y el soporte del tanque (o el área bajo riego con suministro directo) | 2.00 | 2.00 | m |
| H_i | Altura de la boquilla de entrada del tanque desde el suelo | 0.00 | 0.00 | m |
| H_o | Altura de salida del tanque (conexión con el área bajo riego) | 0.00 | 0.00 | m |
| H_f | Pérdida de carga en tubería | 0.23 | 0.46 | m |
| H_{fi} | Pérdida de carga en conectores (de "INPUT_Pérdida de presión bombeo") | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{fi-irr} | Pérdida de presión en el sistema de riego (de "INPUT_Pérdida de presión riego") | 2.38 | 4.98 | m |
| H_m | Pérdida de carga en Caudalímetro | 0.00 | 0.00 | m |
| H_r | Pérdida de carga en filtro/fertilización | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{irr} | Sistema de riego a presión (de "Presión necesaria para plan de riego" and Pérdida de presión riego) | 12.58 | 15.18 | m |
| | Presión necesaria para plan de riego (véase la tabla de referencia debajo) | 1.00 | 1.00 | bar |

SPIS 10: Suministro directo desde el estanque hasta el cultivo.



SPIS 11: Cálculo de caída de presión en el riego por goteo de 0.35 ha (0.5 mz) de cultivo de maíz. Comparativo de caudales.

DISEÑA – Herramienta de cálculo del bombeo

INPUT_Pérdida de presión riego

Configuración de tuberías en el sistema de riego

| | | |
|---|-------------|----------|
| Diámetro de la tubería de suministro principal: | 2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro principal: | 50 | m |
| Diámetro de la tubería de suministro lateral: | 1 1/4 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro lateral: | 40 | m |
| Pérdida de presión total en tuberías | 1.91 | m |

Caudal 1:

3.1 m³/h
0.86 L/s

Configuración del sistema de riego

| Tipo de conector | Configuración 1 | Configuración 2 |
|--|-----------------|-----------------|
| 32° Codo | 0 | 0 |
| 22.5° Codo | 0 | 0 |
| 11.25° Codo | 0 | 0 |
| Válvula de compuerta | 1 | 1 |
| 90° Codo | 1 | 2 |
| Unión en T | 28 | 56 |
| Reductor | 1 | 1 |
| Válvula de retención | 1 | 1 |
| Pérdida de presión total en válvulas y conectores | 0.47 | 0.91 |

0.5 manzana de maíz
Parcela dividida en 4 sub zonas,
Riego de 1 subzona

Parcela dividida en 2 subzonas. Riego de 1 subzona

DISEÑA – Herramienta de cálculo del bombeo

INPUT_Pérdida de presión riego

Configuración de tuberías en el sistema de riego

| | | |
|---|-------------|----------|
| Diámetro de la tubería de suministro principal: | 2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro principal: | 50 | m |
| Diámetro de la tubería de suministro lateral: | 1 1/4 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro lateral: | 40 | m |
| Pérdida de presión total en tuberías | 3.93 | m |

Caudal 2:

4.65 m³/h
1.29 L/s

Configuración del sistema de riego

| Tipo de conector | Configuración 1 | Configuración 2 |
|--|-----------------|-----------------|
| 32° Codo | 0 | 0 |
| 22.5° Codo | 0 | 0 |
| 11.25° Codo | 0 | 0 |
| Válvula de compuerta | 1 | 1 |
| 90° Codo | 1 | 1 |
| Unión en T | 28 | 56 |
| Reductor | 1 | 1 |
| Válvula de retención | 1 | 1 |
| Pérdida de presión total en válvulas y conectores | 1.06 | 2.04 |

0.5 manzana de maíz
Parcela dividida en 4 sub zonas,
Riego de 1 subzona

Parcela dividida en 2 subzonas. Riego de 1 subzona

SPIS 12: Dimensionamiento de bombeo y arreglos FV desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de caudales para riego.

OUTPUT_ Resultados

Suministro directo (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|-------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 15.5 | m ³ /dia |
| Volumen de flujo: | 3.10 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 16.31 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|--------------------|-----------|--------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.5 kWp | a | 0.55 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 0.7 HP | a | 0.7 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 3.3 m ² | a | 3.7 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 0.63 kWp | to | 0.69 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|-----------------------|----------------|
| P pumping (kW) | 0.23 kW |
| P pumping (HP) | 0.31 HP |
| Volume flow: | 0.86 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |

| | |
|-----------------------|-----------------|
| PV Array Size: | 0.31 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

OUTPUT_ Resultados

Suministro directo (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|-------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 23.3 | m ³ /dia |
| Volumen de flujo: | 4.65 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 19.14 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|--------------------|-----------|------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.65 kWp | a | 0.75 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 0.9 HP | a | 1 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 4.3 m ² | a | 5 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 0.81 kWp | to | 0.94 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|-----------------------|----------------|
| P pumping (kW) | 0.40 kW |
| P pumping (HP) | 0.54 HP |
| Volume flow: | 1.29 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |

| | |
|-----------------------|-----------------|
| PV Array Size: | 0.54 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

5.5. Cuatro diseños FV para el riego de 0.7 ha (1 mz) de maíz

Toda la información utilizada en el dimensionamiento de la potencia de bomba y arreglo FV utilizando el *SPIS Toolbox* es la utilizada en la sección 5.4 con la variante de que la demanda hídrica se duplicó a 31 m³/día para satisfacer la demanda de riego para una manzana de cultivo.

5.5.1. Etapa 1: Diseños FV para la extracción de agua subterránea y dirigirla al estanque intermedio

SPIS 13: Información de entrada para el dimensionamiento de riego por goteo de 0.7 ha (1 mz) de un cultivo de maíz.

| Supuestos básicos | | |
|---------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² |
| Reducción solar (pérdidas): | 25 | % |
| Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | |
| Rendimiento estimado fuente de agua: | 9.0 | m ³ /hora |
| Extracción sostenible fuente de agua: | 75% | /hora |
| Tasa diaria de bombeo de agua: | 31.0 | m ³ /día |
| Diámetro tubería: | 2 | pulgada |
| Longitud tubería: | 50.0 | m |
| Material de la tubería de la bomba: | PVC, drawn tubing, glass | |

SPIS 14: Cálculo de la CDT1 para cuatro niveles estáticos de agua 20, 30, 40 y 50 m para una longitud horizontal de tubería de 50 m.

| Determinación de la carga de bombeo | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-----|
| TDH | Carga dinámica total | 20.77 | 30.77 | 40.77 | 50.77 | m |
| H_s | Nivel estático del agua (para bombas sumergibles) o altura de aspiración (para bombas de superficie) | 20.00 | 30.00 | 40.00 | 50.00 | m |
| D | Abatimiento | | | | | m |
| H_e | Diferencia de altura entre el pozo y el soporte del tanque (o el área bajo riego con suministro directo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_i | Altura de la boquilla de entrada del tanque desde el suelo | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_o | Altura de salida del tanque (conexión con el área bajo riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_f | Pérdida de carga en tubería | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | m |
| H_{fi} | Pérdida de carga en conectores (de "INPUT_Pérdida de presión bombeo") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{fi-irr} | Pérdida de presión en el sistema de riego (de "INPUT_Pérdida de presión riego") | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_m | Pérdida de carga en Caudalímetro | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_r | Pérdida de carga en filtro/fertirrigación | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{irr} | Sistema de riego a presión (de "Presión necesaria para plan de riego" and Pérdida de presión riego) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | m |
| | Presión necesaria para plan de riego (véase la tabla de referencia debajo) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | bar |

SPIS 15: Diseños de bombeo solar desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de diseños para CDT de 20 y 30 m.

OUTPUT_ Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|--|
| Necesidades de agua: | 31 | m ³ /día | |
| Volumen de flujo: | 6.20 | m ³ /h | |
| Carga dinámica total: | 20.77 | m | |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² | |

| | | | |
|--|------------------------|---|------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.9 kWp | a | 1.05 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 1.2 HP | a | 1.4 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 6 m² | a | 7 m² |

TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: **1.13 kWp** to **1.31 kWp**

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | | | |
|---|----------------|--|--|
| P pumping (kW): | 0.58 kW | | |
| P pumping (HP): | 0.78 HP | | |
| Volume flow: | 1.72 L/s | | |
| η pump-motor | 0.6 | | |
| <div style="background-color: #8ebf42; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block;">PV Array Size:</div> 0.78 kWp | | | |
| Solar derating factor | 25 % | | |

OUTPUT_ Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|--|
| Necesidades de agua: | 31 | m ³ /día | |
| Volumen de flujo: | 6.20 | m ³ /h | |
| Carga dinámica total: | 30.77 | m | |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² | |

| | | | |
|--|--------------------------|---|---------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 1.4 kWp | a | 1.6 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 1.9 HP | a | 2.1 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 9.3 m² | a | 10.7 m² |

TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: **1.75 kWp** to **2 kWp**

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | | | |
|---|----------------|--|--|
| P pumping (kW): | 0.87 kW | | |
| P pumping (HP): | 1.16 HP | | |
| Volume flow: | 1.72 L/s | | |
| η pump-motor | 0.6 | | |
| <div style="background-color: #8ebf42; color: white; padding: 2px 5px; display: inline-block;">PV Array Size:</div> 1.15 kWp | | | |
| Solar derating factor | 25 % | | |

SPIS 16: Diseño de bombeo solar desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de diseños para CDT para 40 y 50 m.

OUTPUT_Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|-------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 31 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 6.20 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 40.77 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|-------------------|-----------|---------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 1.8 kWp | a | 2.2 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 2.4 HP | a | 3 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 12 m ² | a | 14.7 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 2.25 kWp | to | 2.75 kWp |

| | | | |
|---|-------------------|-----------|-------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 2.1 kWp | a | 2.85 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 2.8 HP | a | 3.8 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 14 m ² | a | 19 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 2.63 kWp | to | 3.56 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|----------------------------------|-----------------|
| P_{pumping} (kW): | 1.15 kW |
| P_{pumping} (HP): | 1.54 HP |
| Volume flow: | 1.72 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 1.53 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

OUTPUT_Resultados

Tank system (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|-------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 31 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 6.20 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 50.77 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|-------------------|-----------|---------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 1.8 kWp | a | 2.2 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 2.4 HP | a | 3 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 12 m ² | a | 14.7 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 2.25 kWp | to | 2.75 kWp |

| | | | |
|---|-------------------|-----------|-------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 2.1 kWp | a | 2.85 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 2.8 HP | a | 3.8 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 14 m ² | a | 19 m ² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 2.63 kWp | to | 3.56 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|----------------------------------|-----------------|
| P_{pumping} (kW): | 1.43 kW |
| P_{pumping} (HP): | 1.91 HP |
| Volume flow: | 1.72 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 1.90 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

5.5.2. Etapa 2: Diseños FV para llevar agua desde el estanque al cultivo con riego por goteo

Véase la sección 5.4.2 para el marco metodológico y el uso del *SPIS Toolbox*; aquí se presentan los resultados bajo el nuevo dimensionamiento del bombeo para el riego de 0.7 ha (1 mz, 7,000 m²) de maíz.

Para el diseño de esta etapa, se utilizaron los siguientes parámetros:

- Volumen de agua diario requerido: 31 m³/día por el cultivo de maíz en una manzana en temporada seca.
- Se dimensionó para dos caudales:
 - 6.2 m³/h (1.72 L/s) el caudal utilizado para la extracción en la sección
 - 6.2 m³/h x 1.5 con el fin de investigar si es económicamente factible reducir el tiempo de riego.
- Altura de succión desde el nivel del agua en el estanque: ≤ 1.5 m
- Presión requerida para el riego por goteo: 1.5 bar (~15 m de altura)

SPIS 17: Información de entrada para el dimensionamiento del bombeo desde estanque de almacenamiento. Riego por goteo para 0.7 ha (1 mz) de cultivo de maíz.

| Supuestos básicos | | | Supuestos básicos | | |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² | Insolación diaria: | 5.0 | kWh/m ² |
| Reducción solar (pérdidas): | 25 | % | Reducción solar (pérdidas): | 25 | % |
| Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | | Tipo de módulo fotovoltaico: | fixed | |
| Rendimiento estimado fuente de ag | 13.0 | m ³ /hora | Rendimiento estimado fuente de ag | 13.0 | m ³ /hora |
| Extracción sostenible fuente de agu | 75% | /hora | Extracción sostenible fuente de agu | 75% | /hora |
| Tasa diaria de bombeo de agua: | 31.0 | m ³ /día | Tasa diaria de bombeo de agua: | 46.5 | m ³ /día |
| Diámetro tubería: | 2 | pulgada | Diámetro tubería: | 2 | pulgada |
| Longitud tubería: | 50.0 | m | Longitud tubería: | 50.0 | m |
| Material de la tubería de la bomba: | PVC, tubo estirado, vidrio | | Material de la tubería de la bomba: | PVC, tubo estirado, vidrio | |

Sistema de riego por goteo para 0.7 ha (1 mz) de maíz

Para el diseño del sistema de riego por goteo en una parcela de una manzana de cultivo de maíz, se ha considerado un espaciamiento entre surcos de 0.8 m, una práctica comúnmente utilizada para este cultivo. Con esta disposición, se requieren aproximadamente 220 surcos, y por tanto, 220 líneas laterales (cintillas de riego), ya que cada surco debe contar con su respectiva línea de distribución.

Dado que las cintillas desechables de bajo costo no deben superar los 40 m de longitud para evitar caídas significativas de presión y asegurar una distribución uniforme del agua, la parcela se dividió en cuatro subzonas de riego. Cada subzona opera con 55 cintillas de 40 m, conectadas en paralelo, lo cual permite mantener la eficiencia hidráulica del sistema.

Esta estrategia permite regar una subzona a la vez, facilitando el control del caudal, reduciendo la presión requerida y optimizando el uso de materiales disponibles localmente. Además, responde tanto a criterios técnicos como económicos, asegurando un diseño viable y accesible para los pequeños productores.

SPIS 18: Carga dinámica total para dos escenarios de caudales.

| Determinación de la carga de bombeo | | | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----|
| | | 6.2 m ³ /h | 9.3 m ³ /h | |
| TDH | Carga dinámica total | 21.21 | 29.86 | m |
| H_s | Nivel estático del agua (para bombas sumergibles) o altura de aspiración (para bombas de superficie) | 1.50 | 1.50 | m |
| D | Abatimiento | | | m |
| H_a | Diferencia de altura entre el pozo y el soporte del tanque (o el área bajo riego con suministro directo) | 2.00 | 2.00 | m |
| H_i | Altura de la boquilla de entrada del tanque desde el suelo | 0.00 | 0.00 | m |
| H_o | Altura de salida del tanque (conexión con el área bajo riego) | 0.00 | 0.00 | m |
| H_l | Pérdida de carga en tubería | 0.77 | 1.57 | m |
| H_ñ | Pérdida de carga en conectores (de "INPUT_Pérdida de presión bombeo") | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{ñ-irr} | Pérdida de presión en el sistema de riego (de "INPUT_Pérdida de presión riego") | 6.75 | 14.58 | m |
| H_m | Pérdida de carga en Caudalímetro | 0.00 | 0.00 | m |
| H_f | Pérdida de carga en filtro/fertirrigación | 0.00 | 0.00 | m |
| H_{irr} | Sistema de riego a presión (de "Presión necesaria para plan de riego" and Pérdida de presión riego) | 16.95 | 24.78 | m |
| | Presión necesaria para plan de riego (véase la tabla de referencia debajo) | 1.00 | 1.00 | bar |

SPIS 19: Cálculo de caída de presión en el riego por goteo de 0.7 ha (1 mz) de cultivo de maíz. Comparativo de caudales.

DISEÑA – Herramienta de cálculo del bombeo

INPUT Pérdida de presión riego

Caudal 1:
6.2 m³/h
1.72 L/s

Configuración de tuberías en el sistema de riego

| | | |
|---|-------------|----------|
| Diámetro de la tubería de suministro principal: | 2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro principal: | 50 | m |
| Diámetro de la tubería de suministro lateral: | 1 1/2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro lateral: | 40 | m |
| Pérdida de presión total en tuberías | 3.18 | m |

Configuración del sistema de riego

| Tipo de conector | Configuración 1 | Configuración 2 |
|--|-----------------|-----------------|
| 32° Codo | 0 | 0 |
| 22.5° Codo | 0 | 0 |
| 11.25° Codo | 0 | 0 |
| Válvula de compuerta | 1 | 0 |
| 90° Codo | 1 | 1 |
| Unión en T | 55 | 110 |
| Reductor | 1 | 0 |
| Válvula de retención | 1 | 0 |
| Pérdida de presión total en válvulas y conectores | 3.57 | 6.90 |

1 manzana de maíz
Parcela dividida en 4 zonas, Riego de 1 subzona

1 manzana de maíz
Parcela dividida en 2 subzonas. Riego de 1 subzona

DISEÑA – Herramienta de cálculo del bombeo

INPUT Pérdida de presión riego

Caudal 2:
9.3 m³/h
2.58 L/s

Configuración de tuberías en el sistema de riego

| | | |
|---|-------------|----------|
| Diámetro de la tubería de suministro principal: | 2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro principal: | 50 | m |
| Diámetro de la tubería de suministro lateral: | 1 1/2 | pulgadas |
| Longitud (total) de la tubería de suministro lateral: | 40 | m |
| Pérdida de presión total en tuberías | 6.56 | m |

Configuración del sistema de riego

| Tipo de conector | Configuración 1 | Configuración 2 |
|--|-----------------|-----------------|
| 32° Codo | 0 | 0 |
| 22.5° Codo | 0 | 0 |
| 11.25° Codo | 0 | 0 |
| Válvula de compuerta | 1 | 0 |
| 90° Codo | 1 | 1 |
| Unión en T | 55 | 110 |
| Reductor | 1 | 0 |
| Válvula de retención | 1 | 0 |
| Pérdida de presión total en válvulas y conectores | 8.02 | 15.52 |

1 manzana de maíz
Parcela dividida en 4 zonas, Riego de 1 subzona

1 manzana de maíz
Parcela dividida en 2 subzonas. Riego de 1 subzona

SPIS 20: Dimensionamiento de bombeo y arreglos FV desde pozo a estanque de almacenamiento: Comparativa de caudales para riego.

OUTPUT_Resultados

Suministro directo (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 31 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 6.20 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 21.21 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|------------------------|----|------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 0.9 kWp | a | 1.05 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 1.2 HP | a | 1.4 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 6 m² | a | 7 m² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 1.13 kWp | to | 1.31 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|-----------------------|-----------------|
| P pumping (kW) | 0.60 kW |
| P pumping (HP) | 0.80 HP |
| Volume flow: | 1.72 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 0.80 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

OUTPUT_Resultados

Suministro directo (Seleccione)

| | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|
| Necesidades de agua: | 46.5 | m ³ /día |
| Volumen de flujo: | 9.30 | m ³ /h |
| Carga dinámica total: | 29.86 | m |
| Tipo módulo fotovoltaico: | Fijo | |
| Insolación diaria: | 5 | kWh/m ² |

| | | | |
|---|---------------------------|----|---------------------------|
| Estimación dimensiones sistema en kilovatios-pico (kWp): | 2.05 kWp | a | 2.45 kWp |
| Estimación dimensiones sistema en caballos de fuerza (HP): | 2.7 HP | a | 3.3 HP |
| Estimación superficie panel solar en m ² : | 13.7 m² | a | 16.3 m² |
| TTA addition to the Toolbox: Estimated PV Array Size in kWp: | 2.56 kWp | to | 3.06 kWp |

TTA's Addition to the SPIS Toolbox: Alternative calculation of Pump Capacity

| | |
|-----------------------|-----------------|
| P pumping (kW) | 1.26 kW |
| P pumping (HP) | 1.69 HP |
| Volume flow: | 2.58 L/s |
| η pump-motor | 0.6 |
| PV Array Size: | 1.68 kWp |
| Solar derating factor | 25 % |

5.6. DISEÑOS INTEGRADOS

Esta sección presenta una combinación de configuraciones técnicas que responden a las necesidades de los pequeños agricultores en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, considerando las condiciones hidrogeológicas, socioeconómicas y climáticas de la región. Estos diseños integran las dos etapas del sistema de bombeo solar: extracción de agua subterránea y distribución hacia el cultivo, adaptándose a diferentes escenarios de carga dinámica total (CDT) y caudales.

Los diseños integrados ofrecen soluciones adaptables y sostenibles para los pequeños agricultores. Al combinar tecnología fotovoltaica con sistemas de riego eficientes, estos diseños contribuyen a mejorar la seguridad hídrica y alimentaria, fortaleciendo la resiliencia frente al cambio climático.

Metodología de integración

Los diseños se dimensionaron para cubrir la demanda de agua en la temporada más seca y en la fase fenológica de máxima exigencia del cultivo de maíz, considerando superficies de 0.35 y 0.7 ha (0.5 y 1 mz).

Los diseños se desarrollaron combinando:

- Cuatro escenarios de CDT1: 20, 30, 40 y 50 m de profundidad de pozo. Nota: los pozos actuales están entre 20 y poco más de 30 m y, en todos los casos, requieren profundización.
- Dos escenarios de CDT2: Para la distribución desde el estanque al cultivo se consideran dos caudales: (i) Caudal 1, igual al de extracción en el pozo (3.1 m³/h para 0.35 ha (0.5 mz) y 6.2 m³/h para 0.7 ha (1.0 mz); y (ii) Caudal 2 = 1.5 × Caudal 1, con el fin de evaluar la reducción del tiempo de riego (4.6 m³/h y 9.3 m³/h, respectivamente).

Este esquema genera ocho configuraciones integradas por cada área cultivada, reflejando la diversidad de condiciones de infraestructura y necesidades de los agricultores.

Componentes principales

Cada diseño incluye:

- Etapa 1: Bombeo desde el pozo al estanque intermedio.
- Etapa 2: Bombeo desde el estanque al cultivo mediante riego por goteo.
- Arreglo fotovoltaico: Dimensionado para satisfacer los requerimientos energéticos de ambas etapas.
- Sistema de almacenamiento: Estanque excavado con capacidad para cubrir dos días de riego.
- Sistema de riego: Cintillas de bajo costo, adaptadas a las condiciones locales.

Beneficios de los diseños

- Flexibilidad: Los diseños se adaptan a diferentes profundidades de pozo y demandas de agua.
- Eficiencia energética: Uso optimizado de energía solar para ambas etapas de bombeo.
- Viabilidad económica: Soluciones accesibles para pequeños productores, con opciones escalables.
- Sostenibilidad: Reducción de costos operativos y dependencia de la red eléctrica.

Tabla 10. Matriz de diseños de bombeo solar para riego de 0.35 ha (0.5 mz) de maíz.

| Diseño | Caudal 1 (m ³ /d) | CDT1 (m) | Caudal Bombeo 2 (m ³ /d) | CDT2 (m) | Potencia de bomba-1 (HP) | Potencia de bomba-2 (HP) | FV1 (kWp) | FV2 (kWp) | Arreglo FV Total (kWp) |
|----------|------------------------------|----------|-------------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| Diseño 1 | 15.5 | 20 | 15.5 | 16.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.80 |
| Diseño 2 | 15.5 | 20 | 23.3 | 19.1 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 1.00 |
| Diseño 3 | 15.5 | 30 | 15.5 | 16.3 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 1.00 |
| Diseño 4 | 15.5 | 30 | 23.3 | 19.1 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 1.20 |
| Diseño 5 | 15.5 | 40 | 15.5 | 16.3 | 0.8 | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 1.20 |
| Diseño 6 | 15.5 | 40 | 23.3 | 19.1 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.6 | 1.40 |
| Diseño 7 | 15.5 | 50 | 15.5 | 16.3 | 1 | 0.4 | 1 | 0.4 | 1.40 |
| Diseño 8 | 15.5 | 50 | 23.3 | 19.1 | 1 | 0.6 | 1 | 0.6 | 1.60 |

Tabla 11. Matriz de diseños de bombeo solar para riego de 0.7 ha (1 mz) de maíz.

| Diseño | Caudal 1 (m ³ /d) | CDT1 (m) | Caudal 2 (m ³ /d) | CDT2 (m) | Potencia de bomba-1 (HP) | Potencia de bomba-2 (HP) | FV1 (kWp) | FV2 (kWp) | Arreglo FV Total (kWp) |
|----------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|
| Diseño 1 | 31.0 | 20 | 31.0 | 21.2 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.6 |
| Diseño 2 | 31.0 | 20 | 46.5 | 29.8 | 0.8 | 1.7 | 0.8 | 1.7 | 2.5 |
| Diseño 3 | 31.0 | 30 | 31.0 | 21.2 | 1.1 | 0.8 | 1.1 | 0.8 | 1.9 |
| Diseño 4 | 31.0 | 30 | 46.5 | 29.8 | 1.1 | 1.7 | 1.1 | 1.7 | 2.8 |
| Diseño 5 | 31.0 | 40 | 31.0 | 21.2 | 1.5 | 0.8 | 1.5 | 0.8 | 2.3 |
| Diseño 6 | 31.0 | 40 | 46.5 | 29.8 | 1.5 | 1.7 | 1.5 | 1.7 | 3.2 |
| Diseño 7 | 31.0 | 50 | 31.0 | 21.2 | 1.9 | 0.8 | 1.9 | 0.8 | 2.7 |
| Diseño 8 | 31.0 | 50 | 46.5 | 29.8 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 3.6 |

Las Tablas 10 y 11 suman 16 escenarios; al cruzarlos, se amplía el conjunto de combinaciones de diseño. Estas combinaciones pueden reducir el tiempo de riego, por ejemplo, incorporando una bomba de mayor potencia en el estanque intermedio, siempre que la solución sea viable según los recursos disponibles, la infraestructura existente (pozo, almacenamiento y conducción) y el volumen de agua aprovechable. Aunque el análisis se vuelve más complejo, en la práctica es posible ajustar los casos reales para optimizar tiempos y capacidades.

Los sistemas de bombeo de agua con energía solar deben diseñarse a la medida de cada necesidad; sin embargo, aquí se busca estandarizar el dimensionamiento de arreglo fotovoltaico (FV) y bombas, para proponer soluciones rápidas y adecuadas a las condiciones de operación de los agricultores. Dado que en la mayoría de parcelas la infraestructura y el agua son limitadas, la metodología también impulsa mejoras graduales en el pozo y en el almacenamiento. Por lo tanto, el sistema se orienta a maximizar el volumen de agua suministrado con los recursos e infraestructura disponibles, mientras incorpora esas mejoras progresivas para elevar su desempeño en el tiempo. La siguiente tabla muestra

los dimensionamientos derivados de las dos tablas anteriores, orientados a satisfacer la demanda de los pequeños agricultores que cultivan 0.35 y 0.7 ha (0.5 y 1 mz), con espacio para mejoras en la infraestructura actual.

Tabla 12. Cuatro diseños de bombeo solar para riego de maíz en temporada seca.

| Diseño | Caudal1 (m ³ /d) | CDT1 (m) | Caudal2 (m ³ /d) | CDT2 (m) | Potencia bomba-1 (HP) | Potencia bomba-2 (HP) | FV1 (kWp) | FV2 (kWp) | Arreglo FV Total (kWp) |
|-------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|------------------------|
| 0.5 mz-Caudal Base | 15.5 | 50 | 15.5 | 16.3 | 0.95 | 0.31 | 1.0 | 0.4 | 1.4 |
| 0.5 mz-Caudal Aumentado | 15.5 | 50 | 23.3 | 19.1 | 0.95 | 0.54 | 1.0 | 0.6 | 1.6 |
| 1.0 mz-Caudal Base | 31 | 50 | 31.0 | 21.2 | 1.9 | 0.8 | 1.9 | 0.8 | 2.7 |
| 1.0 mz-Caudal Aumentado | 31 | 50 | 46.5 | 29.8 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 3.6 |

En la siguiente fase, durante el proceso de selección de equipos, se definirán los modelos y tamaños de bomba en función de la oferta disponible en Guatemala. Ambos tipos de bombas CD y CA pueden ser utilizadas, los proveedores de bombas solares proveen los convertidores necesarios para las bombas que ofrecen. Asimismo, para cada configuración se deberán especificar los equipos auxiliares a utilizar.

La integración de los equipos auxiliares es esencial para maximizar la eficiencia, proteger los componentes principales y garantizar la sostenibilidad operativa del sistema en las condiciones locales de Baja Verapaz. Entre los equipos auxiliares se listan los siguientes:

- Sensores de nivel: Debido a que las fuentes de agua de la región son de baja profundidad y de recarga lenta, se contempla el uso de sensores de nivel como protección principal de las bombas. Estos dispositivos detienen automáticamente la operación cuando el nivel desciende por debajo de un umbral seguro, evitando la marcha en seco y posibles daños irreparables; una vez recuperado el nivel, permiten reactivar la bomba de forma controlada.
- Controladores o inversores: Regulan el funcionamiento de las bombas, adaptan la energía disponible y protegen el sistema contra sobrecargas, bajas tensiones y fluctuaciones de voltaje. En sistemas híbridos, los inversores permiten la conexión tanto a la red eléctrica como al sistema fotovoltaico.
- Estructuras de soporte y cableado: Garantizan la instalación segura y eficiente de los paneles solares y la conexión eléctrica entre los componentes del sistema.

5.7. Dimensionamiento de SHS

La siguiente figura presenta tres paquetes de energía que se utilizaron para dimensionar Sistemas Solares Domiciliarios (Solar Home Systems, SHS) orientados a familias de agricultores ubicados en áreas fuera de la red, con el fin de brindarles acceso a electricidad confiable además de bombeo de agua.

El principio es que, cuando la bomba de extracción del pozo no esté en operación, debido por agotamiento o lenta recarga del pozo, la energía del arreglo FV 1 pueda almacenarse en la batería del SHS para cubrir la demanda de la vivienda y mejorar el acceso a electricidad. Según el nivel de energía que la vivienda pueda requerir o costear, es posible incrementar tanto el tamaño del arreglo FV 1 como la capacidad de almacenamiento en baterías.”

Cada paquete refleja diferentes niveles de servicio energético, tomando en cuenta los aparatos eléctricos que comúnmente utilizan los hogares rurales. Estos niveles parten de soluciones básicas para cubrir necesidades esenciales y avanzan de forma progresiva hacia mayores demandas de energía. Los paquetes responden tanto a lo que ya está presente en los hogares rurales como a la posibilidad de que las familias, según sus capacidades, adquieran más aparatos eléctricos.

En la figura se muestran, para cada paquete, la energía diaria necesaria para satisfacer las demandas de acuerdo con los aparatos que posee cada hogar, la potencia del arreglo fotovoltaico requerida (W) y la capacidad de la batería necesaria para garantizar dos días de autonomía.

El dimensionamiento de los sistemas se realizó bajo los siguientes parámetros de diseño: sistema nominal de 12 Vcc, 5.0 horas PSH, arreglo fotovoltaico fijo, controlador MPPT con eficiencia del 98%, y pérdidas por cableado del 3%. Además, se consideró una eficiencia ida y vuelta de batería del 75% y un banco de baterías con dos días de autonomía, una profundidad máxima de descarga del 50%. Todos los sistemas incluyen inversor, por lo que las cargas se consideran en corriente alterna.

| Paquete de Energía | Niveles de Servicio | Energía Diaria (Wh/día) | Arreglo FV (W) | Capacidad de batería para 2 días de autonomía (A-h) |
|--------------------|---|-------------------------|----------------|---|
| 1 |  | 550 | 200 | 275 |
| 2 |  | 1100 | 400 | 555 |
| 3 |  | 1925 | 660 | 975 |

Figura 10. Paquetes de energía para el dimensionamiento de SHS.

5.8. Alcance del diseño y flexibilidad tecnológica

Este documento corresponde a la ingeniería de diseño y establece criterios, supuestos y parámetros de dimensionamiento para orientar decisiones técnicas. Su contenido es referencial para etapas posteriores y no debe interpretarse como el instrumento que complementa la contratación; cualquier proceso de adquisición se estructurará más adelante con sus propias especificaciones y términos.

Flexibilidad de configuraciones. Las soluciones aquí descritas son representativas y podrán ajustarse según el portafolio de los proveedores, la disponibilidad local y las capacidades de los equipos ofrecidos (controladores, bombas, sensores y protecciones).

Condición mínima de equivalencia. Toda variante deberá preservar el objetivo de entrega técnica, incluyendo como mínimo:

- Desempeño hidráulico (caudal y CDT en el punto de diseño).
- Confiabilidad y protecciones críticas (marcha en seco, sobrecargas, etc.).
- Eficiencia y seguridad (eléctrica e hidráulica).
- Viabilidad de O&M (repuestos y soporte local).

6. CONCLUSIONES

El presente informe ha desarrollado un análisis integral para la implementación de Sistemas de Riego Solar (SPIS) en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, en el corredor seco de Baja Verapaz, Guatemala. A continuación, se resumen las principales conclusiones:

Importancia de los SPIS en Baja Verapaz

- Los SPIS representan una solución sostenible y adaptada para pequeños agricultores en una región altamente vulnerable al cambio climático. Su implementación permite garantizar el suministro de agua durante la época seca, mejorando la seguridad alimentaria y la resiliencia agrícola.
- La alta irradiación solar en Baja Verapaz, con un promedio anual de 5.24 kWh/m²/día, proporciona condiciones óptimas para el uso de energía FV en aplicaciones agrícolas.

Diagnóstico de necesidades y condiciones locales

- Los pequeños agricultores enfrentan limitaciones significativas en infraestructura, como pozos artesanales de baja recarga, sistemas de almacenamiento insuficientes y acceso limitado a energía eléctrica confiable.
- La alta demanda de agua de cultivos especialmente durante las etapas críticas de desarrollo vegetativo y floración, refuerza la necesidad de sistemas de riego eficientes y adaptados a las condiciones locales.

Configuraciones técnicas propuestas

- Las configuraciones incluyen opciones con estanques intermedios y doble bombeo, así como sistemas con tanques elevados y distribución por gravedad. Además, se evaluaron sistemas híbridos solar–red eléctrica para garantizar la continuidad del riego en condiciones de baja irradiación o cortes eléctricos.
- Se desarrollaron 16 dimensionamientos integrados de SPIS, combinando diferentes escenarios de carga dinámica total y caudales. Estos ofrecen flexibilidad para adaptarse a las condiciones hidrogeológicas y socioeconómicas de los agricultores.
- Se seleccionaron 4 dimensionamientos que optimizan el uso de energía solar y agua, adaptándose a las condiciones de infraestructura de los pozos y las necesidades de mejora. Estos diseños incluyen opciones para riego de 0.5 y 1 manzana de cultivo, con diferentes combinaciones de CDT y caudales.

Sistemas Solares Domiciliarios (SHS)

- Se propusieron cinco paquetes de energía para viviendas rurales fuera de la red, diseñados para aprovechar la energía sobrante del arreglo fotovoltaico cuando la bomba no está en operación.

- Los SHS ofrecen acceso a electricidad confiable para cubrir necesidades básicas como iluminación, refrigeración y uso de electrodomésticos, mejorando la calidad de vida de las familias agricultoras.

Configuraciones off-grid y on-grid

- Fuera de la red: Los sistemas están diseñados para operar exclusivamente con energía solar, priorizando el bombeo de agua y utilizando la energía sobrante para las necesidades domésticas. Incluyen baterías para garantizar autonomía energética.
- Conectados a la red: Los sistemas híbridos combinan energía solar y red eléctrica, utilizando la red como respaldo en caso de baja o nula irradiación solar.

Beneficios de los SPIS

- Eficiencia energética: Los sistemas fotovoltaicos optimizan el uso de energía solar, reduciendo costos operativos y la dependencia de combustibles fósiles.
- Viabilidad económica: Las soluciones propuestas son accesibles para pequeños productores, con opciones escalables y adaptadas a sus capacidades técnicas y financieras.
- Sostenibilidad: Los SPIS contribuyen a la reducción de emisiones de carbono y promueven prácticas agrícolas resilientes frente al cambio climático.

Recomendaciones para la implementación

- Es fundamental profundizar los pozos artesanales para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de bombeo.
- Se recomienda fortalecer la infraestructura de almacenamiento de agua, priorizando estanques excavados con capacidad suficiente para cubrir al menos tres días de riego.
- La capacitación técnica de los agricultores en el manejo de sistemas FV y de riego por goteo es clave para asegurar la adopción y el mantenimiento de las tecnologías propuestas.
- Es necesario establecer mecanismos de financiamiento rural que permitan a los pequeños productores acceder a las tecnologías de riego solar, reduciendo las barreras económicas iniciales.
- Implementar prácticas de medición de caudales en las fuentes de agua, a fin de asegurar un dimensionamiento adecuado y un manejo sostenible del recurso hídrico

Impacto esperado

La implementación de los SPIS en el corredor seco de Baja Verapaz tiene el potencial de transformar la agricultura local, permitiendo a los pequeños productores superar las limitaciones climáticas y técnicas que enfrentan actualmente. Al garantizar un suministro de agua confiable y sostenible, los SPIS contribuirán a mejorar la productividad agrícola, generar ingresos estables y fortalecer la seguridad alimentaria en la región. Además, su adopción refuerza el compromiso con la transición hacia energías renovables y prácticas agrícolas resilientes frente al cambio climático.