



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.

E4. Selección de Tecnologías SPIS

DATE 15/12/25

REF CI-24-00129

VERSION 1.0

PREPARADO PARA



- 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** Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Climate Technology Centre and Network (CTCN)
- CONSULTOR:** Trama TecnoAmbiental, S.L. (TTA)
- FINANCIADO POR:** Fondo de Adaptación a través del Acelerador de Innovación Climática (AFCIA), implementado por el CTCN

E4. Selección de Tecnologías

DOCUMENTOS RELACIONADOS	TIPO DE DOCUMENTO	BORRADOR / FINAL	FECHA DE ENTREGA
E1. Plan de Trabajo Plan de Monitoreo y Declaración de Impacto Línea base del AFCIA Tracker	Word y Excel	Final	9/02/2025
E2. Diagnóstico de Prácticas de Riego y Coordinación con Organizaciones Locales	Word	Final	16/05/2025
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	Word	Draft	6/08/2025

AUTORA Alma Cota

Tabla de Contenido

Figuras iv

Glosario	v
Resumen Ejecutivo	6
INTRODUCCIÓN	8
1.1.Antecedentes.....	8
1.2.Objetivo	8
1.3.Estructura del informe	9
2. Dimensionamientos representativos de los SPIS	10
2.1.Configuraciones representativas	10
2.2.Datos técnicos clave para el dimensionamiento	12
2.3.Dimensionamiento.....	13
2.3.1. Herramienta SPIS Toolbox	14
3. Opciones Tecnológicas del Mercado Solar en Guatemala	15
3.1.Panorama del mercado local e internacional	15
3.1.1. Distribuidores e instaladores identificados	15
3.1.2. Productos de bombeo solar en Guatemala	16
3.2.Economías de escala y estandarización tecnológica	25
4. Análisis Económico.....	26
4.1.Invest_Payback Tool.....	26
4.2.Metodología.....	27
4.2.1. Parámetros económicos.....	28
4.2.2. Variables económicas	28
4.1.Análisis económico 1: SPIS con rebombeo para el riego de 0.35 ha.....	30
4.1.1. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 21 simulaciones	33
4.1.2. Resultados principales del análisis económico 1	34
4.2.Análisis económico 2: SPIS para el riego de 0.7 ha: Bombeo de extracción sin rebombeo.....	36
4.2.1. Caso 1: Rol del subsidio como variable de política y diseño	39
4.2.2. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 40 simulaciones para el caso 1.....	40
4.2.3. Caso 2: Datos de entrada en SPIS Invest Toolbox	41
4.2.4. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 40 simulaciones para el caso 2.....	44
4.3.Consideraciones sobre el costo del bombeo nocturno	45
4.3.1. Estrategia de operación del bombeo solar-red.....	45
4.3.2. Cómputo de la energía facturable asociada al uso de la red.....	46
4.3.3. Reparto comunitario del costo.....	46
4.3.4. Implicaciones económicas del uso de la red.....	46

E4. Selección de Tecnologías

4.4.Efecto de la inversión en riego por goteo sobre la factibilidad y el financiamiento del proyecto	47
4.5.Condiciones y costos de perforación de pozos artesanales	47
4.6.Limitaciones del análisis financiero y criterios socioeconómicos complementarios	48
5. Conclusiones.....	50
Anexo A. Fichas técnicas	51

Figuras

Figura 1. SPIS híbrido solar-red con estanque intermedio.	12
Figura 2. Modelos relevantes de la serie PS1 para este proyecto.....	18
Figura 3. Dimensionamiento en línea y selección de bomba de la serie PS1 para el bombeo de extracción del pozo al estanque intermedio con un CDT de 20 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.	18
Figura 4. Producción diaria mensual y horaria esperada de PS1-700 para un CDT de 20 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.....	19
Figura 5. Dimensionamiento y selección de bomba de la serie PS1 para el bombeo desde los estanques a nivel del suelo hasta el área de cultivo con un CDT de 6 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.....	19
Figura 6. Producción diaria mensual y horaria esperada de PS1-200 para un CDT de 6 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.....	20
Figura 7. Dimensionamiento en Compass, la plataforma de Lorentz para la extracción de agua a una CDT de 50 m y una demanda diaria de 31 m ³ /día.....	21
Figura 8. Especificaciones técnicas de las bombas PS2 seleccionadas para CDTs mayores.	22
Figura 9. Curvas de desempeño de bombas Solartech de la serie SPM.....	23
Figura 10. Especificaciones técnicas de la SPM31100SO30S, bomba seleccionada para el proyecto por su potencial de trabajo en el rango de CDTs y caudales requeridos para el proyecto.	24
Figura 11. Curvas de desempeño hidráulico de bombas Difful con potencial para su implementación en el proyecto.	25
Figura 12. Configuración del sistema del análisis económico 1.....	30
Figura 13. Flujo de efectivo y tiempo de repago del sistema.....	32
Figura 14. Configuración del sistema del análisis económico 2, caso 1.	36
Figura 15. Configuración del sistema del análisis económico 2, caso 2.	37
Figura 16. Flujo de efectivo y tiempo de repago del sistema.....	38

Glosario

Abreviación	Descripción
AFCIA	Acceptor de Innovación Climática, mencionado como financiador del proyecto
CDT	Carga Dinámica Total
CTCN	Centro y Red de Tecnología Climática - <i>Climate Technology Centre and Network</i>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Food and Agriculture Organization
FV	Fotovoltaico
GIZ	Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional - <i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH</i>
HP	Caballos de Fuerza -Horsepower
TIR/IRR	Tasa Interna de Retorno/Internal Rate of Return
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MPPT	Seguimiento del punto de máxima potencia - Maximum Power Point Tracking
PSH	Hora Solar Pico (Peak Sun Hours)
SPIS	Sistemas de Riego Solar- Solar Powered Irrigation Systems
SPIS Toolbox	Herramienta metodológica para el diseño de sistemas de riego solar
TTA	Trama TecnoAmbiental S.L.
VPN/VAN/NPV	Valor Presente Neto/Valor Actual Neto/Net Present Value

Resumen Ejecutivo

El presente documento corresponde al Producto E4: Selección de Tecnologías, desarrollado en el marco del proyecto “Fomento de Tecnologías de Riego Sostenible”, implementado por el Climate Technology Centre and Network (CTCN) en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de Guatemala, y financiado por el Fondo de Adaptación a través del Acelerador de Innovación Climática (AFCIA). El proyecto se orienta a fortalecer la resiliencia climática de pequeños agricultores en situación de alta vulnerabilidad en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, en el corredor seco de Baja Verapaz, mediante la adopción de sistemas de riego solar (SPIS) bajo el enfoque del nexo agua-energía-alimentos.

Este entregable da continuidad a las etapas previas de diagnóstico y diseño tecnológico, y tiene como objetivo definir y documentar la selección de las tecnologías de riego solar más adecuadas para su futura implementación piloto. Para ello, el análisis integra criterios técnicos, económicos y de contexto socioinstitucional, con el fin de asegurar soluciones viables, sostenibles y replicables en el mediano y largo plazo.

A partir del trabajo desarrollado en la fase anterior, se analizaron dimensionamientos preliminares, de los cuales se seleccionaron configuraciones representativas para superficies agrícolas de 0.35 y 0.7 hectáreas (0.5 y 1 manzana), considerando las condiciones reales observadas en campo: pozos artesanales con recarga variable, limitaciones de infraestructura, topografía diversa y una alta dependencia de la radiación solar. Los sistemas propuestos incorporan bombeo solar fotovoltaico, almacenamiento en estanques intermedios y riego por goteo, con eficiencias hidráulicas estimadas del 90%.

El documento distingue dos esquemas tecnológicos principales:

1. SPIS completamente solares, recomendados para sitios sin acceso a red eléctrica o con suficiente disponibilidad hídrica durante las horas de mayor irradiación, y
2. SPIS híbridos solar-red, concebidos como soluciones flexibles para contextos donde la recarga del pozo ocurre principalmente durante la noche o en condiciones de nubosidad prolongada. En estos últimos, se prioriza la operación solar y se limita el uso de la red eléctrica a situaciones excepcionales, dada su relevancia económica para los pequeños productores.

Como parte de la selección tecnológica, se realizó un análisis detallado del mercado de bombeo solar en Guatemala, identificando a los principales distribuidores, instaladores y marcas disponibles en el país. El estudio concluye que el mercado nacional cuenta con capacidades técnicas suficientes para la implementación de SPIS, destacando tres tecnologías dominantes: Lorentz, Solartech y Difful, que cubren distintos rangos de inversión, desempeño y complejidad técnica. Esta diversidad permite adaptar las soluciones a las condiciones económicas de los usuarios, al tiempo que abre oportunidades para la estandarización tecnológica y la generación de economías de escala.

El análisis económico se desarrolló utilizando la herramienta SPIS Invest_Payback Toolbox, mediante múltiples simulaciones que evaluaron indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (IRR), el período de recuperación y la cuota mensual de financiamiento. Los resultados muestran que la viabilidad financiera de los sistemas depende de variables clave como el nivel de ingresos de los agricultores, el acceso a subsidios iniciales, las condiciones de financiamiento y, en el caso de sistemas híbridos, el costo del uso de la red eléctrica. Se concluye que, si bien ciertos escenarios presentan factibilidad financiera bajo

criterios tradicionales, la rentabilidad económica por sí sola no es suficiente para justificar la implementación del proyecto en contextos de alta pobreza rural.

En este sentido, el documento subraya la necesidad de complementar el análisis financiero con criterios socioeconómicos y estratégicos, reconociendo que la población objetivo está conformada mayoritariamente por agricultores de subsistencia, muchas de ellas mujeres, con ingresos bajos, irregulares o no formalizados. Por tanto, la adopción de SPIS debe entenderse como una inversión en resiliencia climática, seguridad alimentaria, diversificación productiva y reducción de la vulnerabilidad energética, más que como un proyecto estrictamente rentable en el corto plazo.

Finalmente, el informe destaca la importancia de acompañar la implementación piloto con mecanismos financieros adaptados y un sistema robusto de monitoreo y evaluación, que permita medir impactos en productividad agrícola, ingresos familiares, bienestar nutricional y capacidad de réplica. Esta evidencia será clave para justificar futuras escalas de inversión pública y cooperación internacional, y para consolidar un modelo de riego solar sostenible e inclusivo en el corredor seco de Guatemala.

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 articule las dimensiones técnicas, sociales y económicas.

El proyecto tiene como meta fortalecer la capacidad adaptativa y la resiliencia del sector agrícola en Baja Verapaz, una región particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático. Al mismo tiempo, busca abordar los desafíos del nexo agua-energía-alimentos, impulsando prácticas de riego sostenibles a través de tecnologías innovadoras como los SPIS.

Durante la primera fase de la asistencia técnica se avanzó en la promoción del riego solar como una alternativa viable y sostenible. Esta etapa incluyó un estudio exhaustivo de las prácticas de riego en los municipios de Rabinal y San Miguel Chicaj, basado en trabajo de campo y en un proceso participativo que integró a agricultores, representantes comunitarios, instituciones académicas, entidades gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil, agencias de cooperación internacional y sector privado. Como resultado, se desarrolló una propuesta de modelo de negocios para facilitar la adopción de la tecnología SPIS.

En la segunda etapa, el trabajo se centró en la identificación de configuraciones tecnológicas plausibles, capaces de responder a las condiciones típicas de pequeños agricultores que carecen de infraestructura óptima y que requieren, en algunos casos, soluciones de doble bombeo solar. A partir de este análisis se diseñaron modelos representativos de SPIS, concebidos como referencias replicables y adaptables a diversas realidades productivas, organizativas y técnicas. Dichos diseños constituyeron un insumo clave para orientar la fase siguiente.

El presente documento corresponde a la tercera etapa de la asistencia técnica y da continuidad a los entregables previos, con el propósito de seleccionar la tecnología SPIS más adecuada para su futura implementación piloto.

Con estos elementos, el proyecto avanza hacia la definición de soluciones tecnológicas viables, sostenibles y adaptadas a las necesidades de las comunidades objetivo, consolidando la articulación técnica, social y económica que caracteriza a esta iniciativa.

1.2. Objetivo

Definir y documentar la selección de la tecnología de riego solar (SPIS) más adecuada para su futura implementación piloto en el corredor seco de Baja Verapaz, mediante la elaboración de fichas técnicas, el análisis de costos y un taller de validación con actores locales. Esta selección considera no solo la eficiencia y sostenibilidad de las configuraciones propuestas, sino también la existencia en Guatemala de capacidades locales y de una red de distribuidores e instaladores calificados, a fin de garantizar su implementación, operación y mantenimiento en el mediano y largo plazo.

1.3. Estructura del informe

Este informe se organiza en cinco capítulos que conducen de manera secuencial desde el contexto general del proyecto hasta la selección de la tecnología de riego solar (SPIS) más adecuada para su implementación programa nacional para la adopción de esta tecnología. La estructura es la siguiente:

1. **Introducción:** Presenta el contexto y los antecedentes del proyecto, define el objetivo principal del informe y describe el alcance de esta tercera etapa de la asistencia técnica.
2. **Dimensionamientos representativos de los SPIS:** Detalla los diseños representativos de los sistemas de riego solar generados en la etapa anterior. Se describen las configuraciones de referencia, sus características técnicas y su pertinencia para las condiciones locales de los pequeños agricultores.
3. **Opciones tecnológicas del mercado solar en Guatemala:** Analiza las tecnologías disponibles en el mercado local e internacional, identificando los distribuidores e instaladores más relevantes y evaluando las características de las bombas solares que cumplen con los requisitos del proyecto.
4. **Análisis económico:** Presenta los resultados de los análisis financieros realizados para las configuraciones de SPIS propuestas. Incluye el impacto de los subsidios, los ingresos de los productores, las condiciones de financiamiento y los costos operativos, así como las limitaciones del análisis financiero y los beneficios socioeconómicos complementarios.
5. **Conclusiones:** Resume los hallazgos clave del informe, destacando las recomendaciones para la implementación piloto y los beneficios sociales y estratégicos del proyecto.

2. Dimensionamientos representativos de los SPIS

Durante la segunda etapa de la asistencia técnica se desarrollaron diseños representativos de sistemas de riego solar (SPIS) orientados a pequeños agricultores de Rabinal y San Miguel Chicaj, en el corredor seco de Baja Verapaz. Esta fase respondió a la necesidad de garantizar un suministro hídrico confiable y sostenible frente a las sequías prolongadas, lluvias irregulares y limitaciones de infraestructura de las comunidades rurales.

El trabajo comprendió 16 dimensionamientos preliminares, de los cuales se seleccionaron cuatro configuraciones de referencia adaptadas a diferentes condiciones de carga dinámica total (CDT) y caudal requerido, cubriendo áreas de riego de 0.5 a 1 manzana ($\approx 0.35-0.7$ ha). Las configuraciones integran tecnologías de bombeo fotovoltaico, almacenamiento y distribución de agua mediante riego por goteo, con una eficiencia estimada del 90%.

2.1. Configuraciones representativas

Los diseños finales consideran las restricciones hídricas de las fuentes y la organización social de los usuarios, y se agrupan en dos esquemas típicos en los dos municipios:

SPIS con estanques intermedios y doble bombeo

- Recomendado para parcelas con pozos que ofrecen recarga suficiente, independientemente de su acceso a la red eléctrica.
- Producción de agua limitada para el riego de parcelas cuyos pozos presentan una recarga lenta.
- Utiliza dos etapas de impulsión:
 - bombeo de extracción desde el pozo hasta un estanque de almacenamiento al nivel del suelo y,
 - bombeo de riego desde el estanque hacia la red de distribución para el riego.
- Bombes de extracción y de riego independientes.
- **Los dos bombeos son estrictamente solares fotovoltaicos.** Y aplica a:
 - sitios fuera de la red eléctrica.
 - sitios con fuentes de agua que pueden proveer la demanda de agua diaria durante las horas de mayor irradiación solar¹.
- Requiere un tanque de al menos 2 días de autonomía para cubrir periodos de baja irradiación.
- Se prevé la instalación de sensores de nivel en pozos y estanques para evitar el vaciado y proteger las bombas de operación en seco.
- Sistema de riego eficiente.

SPIS híbrido solar-red eléctrica

- Combina energía solar y red eléctrica para habilitar el riego cuando este sea necesario.
- Recomendado para incrementar la producción de agua en zonas que, aun contando con red eléctrica, enfrentan altos costos de energía o cortes prolongados.

¹ **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.

- Recomendado para parcelas cuyos pozos presentan recarga lenta, en las que el nivel del pozo suele recuperarse durante la noche.
- Es necesario cuantificar el costo facturable del bombeo mediante la red, ya que podría representar un gasto significativo para algunos pequeños productores.
- Utiliza dos etapas de impulsión:
 - bombeo de extracción desde el pozo hasta un estanque de almacenamiento al nivel del suelo y,
 - bombeo de riego desde el estanque hacia la red de distribución para el riego.
- Bombes de extracción y de riego independientes.
- La extracción se prioriza utilizando energía solar como fuente principal.
- La energía de la red eléctrica impulsa a la **bomba de extracción únicamente**
 - durante las noches cuando el pozo tiene suficiente nivel de agua o,
 - durante días con nublados prolongados y periodos críticos para el riego de los cultivos.
- Se prevé la instalación de sensores de nivel en los pozos para evitar el vaciado y proteger las bombas de operación en seco.
- El **bombeo de riego es estrictamente solar** para reducir costos de operación.
- Requiere un tanque de al menos 2 días de autonomía para cubrir periodos de baja irradiación.
- Sistema de riego eficiente.

Ambas configuraciones se distinguen únicamente por la incorporación de conexión a la red eléctrica. En este caso, el sistema incluye un inversor híbrido que alimenta una bomba sumergible destinada a extraer agua del pozo y transferirla a un estanque de almacenamiento a nivel del suelo. Desde allí, una segunda bomba (superficial o sumergible) impulsa el agua hacia la red de riego.

Esta solución garantiza la continuidad del servicio en condiciones de baja irradiación solar, durante la noche o frente a cortes eléctricos, siempre que el pozo disponga del nivel adecuado para bombeo. Además, permite la operación simultánea de la extracción y el riego, evitando que el abastecimiento de agua se vea comprometido durante los períodos de mayor recarga del pozo.

La configuración prioriza el aprovechamiento de los períodos de alta irradiación solar para maximizar el almacenamiento, pero también ofrece la posibilidad de bombear en ausencia de sol cuando el pozo está recargado y listo para operar. Con ello, se incrementa de manera significativa la flexibilidad, resiliencia operativa del sistema y es posible maximizar el agua extraída.

Idealmente, el sistema eléctrico debería entrar en operación cuando el nivel del pozo fuera suficiente, en el contexto real, el tiempo real de bombeo operado por la red eléctrica dependerá de los costos de electricidad y la capacidad de los agricultores para pagar el recibo mensual, además de la capacidad de los pozos para su recuperación. Por otro lado, los agricultores también van a tomar decisiones entre las necesidades de agua dependiendo de las etapas fenológicas de los cultivos en cuestión (periodos críticos de riego) y los costos de bombeo durante la noche o periodos prolongados de nublados.

Idealmente, el sistema eléctrico solo debería operar cuando haya nivel suficiente en el pozo y falte radiación solar. Sin embargo, en la práctica, el tiempo de bombeo operado mediante la red eléctrica dependerá tanto de los costos de la energía como de la capacidad de los agricultores para cubrir el recibo mensual, además de la velocidad de recuperación de los pozos. Asimismo, los agricultores tomarán decisiones basadas en las necesidades hídricas según las etapas fenológicas de los cultivos, particularmente en los periodos críticos de riego.

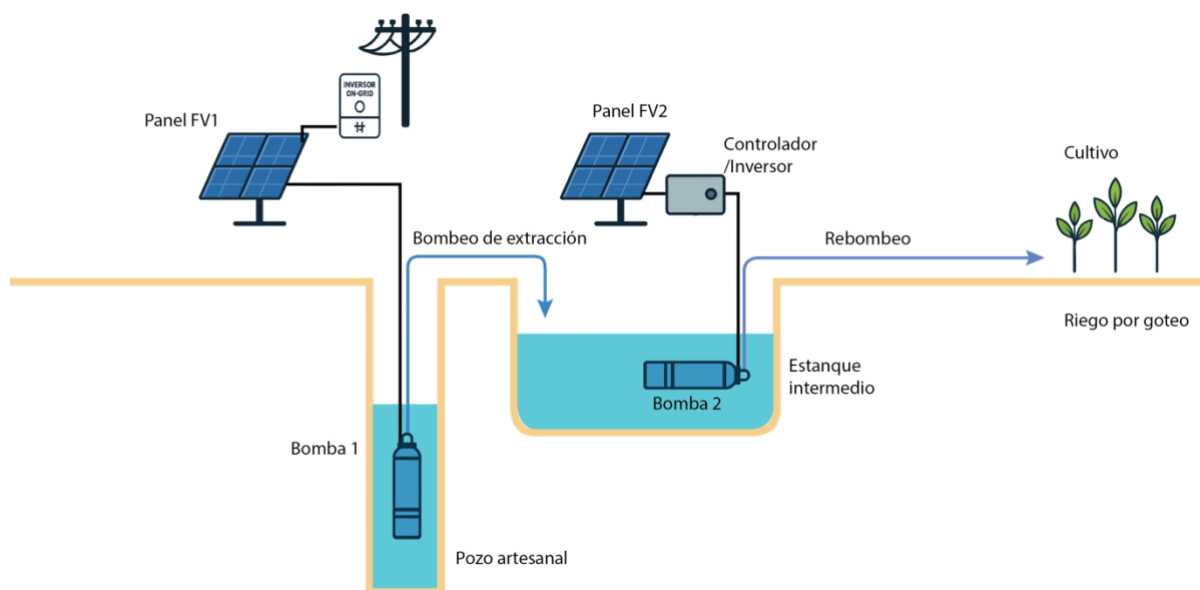


Figura 1. SPIS híbrido solar-red con estanque intermedio.

2.2. Datos técnicos clave para el dimensionamiento

Los diseños incorporan criterios técnicos que ahora orientarán la selección de la tecnología más adecuada:

- Demanda hídrica: Basada en el maíz como cultivo de referencia (3,700 m³/ha por ciclo – demanda ajustada debido al impacto del cambio climático).²
- Soluciones dimensionadas para 0.35 ha (0.5 mz) y 0.7 ha (1 mz).
- CDT de hasta 50 m, lo cual aseguraría la operación para todas las situaciones encontradas en campo con la posibilidad de profundización del pozo. **Esto considera los datos de las fuentes de agua observadas en los municipios en cuestión (profundidad y tasa de recuperación).**
- Caudales de extracción base equivalente a la demanda diaria de agua
 - 15.5 m³/día para 0.35 ha
 - 31.0 m³/día para 0.7 ha
- Caudales de riego base y aumentados (para reducir los tiempos de riego).
 - 15.5 m³/día y 23.3 m³/día para 0.35 ha
 - 31.0 m³/día y 46.5 m³/día para 0.7 ha
- Insolación diaria³ de 5 kWh/m²
- Panel solar fotovoltaico fijo con ángulo azimutal 0° y una inclinación de latitud + 15°
- Sistema de riego: Riego por goteo con cintillas de bajo costo, operando a 0.4 - 1.0 bar.

² Tabla 3. Demanda de agua por cultivo, por etapa fenológica, considerando un 10% del efecto del cambio climático en la evapotranspiración. E3. Desarrollo de tres diseños potenciales para el Sistema de Riego Solar.

³ 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.

2.3. Dimensionamiento

El dimensionamiento proporcionó los datos necesarios de demanda diaria de agua, información de la fuente de agua (profundidad y tasa de recuperación), la topografía del sitio (distancias y elevaciones) y el recurso solar (patrones de irradiación a lo largo del año) para estimar la demanda energética de las bombas, seleccionar el equipo y determinar los costos.

Existen dos enfoques generales para dimensionar y seleccionar sistemas de bombeo solar.

1. Dimensionamiento genérico: se basa en principios físicos, no en productos específicos.
2. Enfoque comercial: se basa en datos de productos o software de diseño de proveedores de bombeo solar. Este se utiliza para la selección de productos y sistemas predimensionados.

El dimensionamiento genérico enseña factores de diseño específicos y la teoría general. También sirve para la detección de errores y para evaluar la precisión de propuestas existentes o de la competencia. Para estimaciones rápidas y aproximadas, se dispone de métodos simplificados. La fórmula del factor de trabajo hidráulico calcula la energía necesaria para elevar un volumen diario de agua.

Ecuación 1

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

Ecuación 2

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

El dimensionamiento independiente mediante la ecuación fundamental de bombeo es clave para evitar el sobredimensionamiento de los sistemas de riego solar. Este análisis teórico permite definir con precisión la potencia de las bombas y el tamaño de los arreglos fotovoltaicos en función de las necesidades reales de caudal y carga dinámica total. Sin embargo, este dimensionamiento corresponde solo a la primera etapa, en la que se determinan las necesidades y se estiman los tamaños del sistema. La siguiente etapa exige **verificar las bombas que efectivamente ofrecen los distribuidores locales**, de modo que se puedan utilizar sus curvas de desempeño específicas. Solo así es posible concretar el diseño final, que incluye el equipo seleccionado y disponible en el mercado, garantizando que la instalación sea técnica y económicamente viable.

Tabla 1. Cuatro diseños de bombeo solar para riego de maíz en temporada seca, calculados con la ecuación fundamental para bombeo de agua.

Diseño	Caudal1 (m³/d)	CDT1 (m)	Caudal2 (m³/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	0.94	0.31	1.25
0.5 Mz-Caudal Aumentado	15.5	50	23.3	19.1	0.95	0.54	0.94	0.54	1.48
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

2.3.1. Herramienta SPIS Toolbox

En el entregable “E3. Desarrollo de tres diseños potenciales para el SPIS, en función de estructuras organizativas sociales, cultivos y potencial dentro de la cadena de valor,” se detalló el uso de la herramienta *SPIS Toolbox_Pump Sizing Tool* para el dimensionamiento del sistema de bombeo solar (bombas + paneles), con base en requerimientos diarios de agua, profundidad o altura del pozo, y radiación solar del sitio y se generaron propuestas preliminares de tamaños de bombas a partir de cálculos teóricos y de la base de datos incluida en la *SPIS Toolbox*.

Tabla 2. Cuatro diseños de bombeo solar para riego de maíz en temporada seca, calculados con SPIS ToolBox

Diseño	Caudal1 (m ³ /d)	CDT1 (m)	Caudal 2 (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	1.4 - 1.8	0.7	1.3 - 1.7	0.6 - 0.7	1.9 - 2.4
0.5 Mz-Caudal Aumentado	15.5	50	23.3	19.1	1.4 - 1.8	0.9 - 1.0	1.3 - 1.7	0.8 - 1.0	2.1 - 2.7
1.0 Mz-Caudal Base	31	50	31.0	21.2	2.8 - 3.8	1.2 - 1.4	2.6 - 3.6	1.1 - 1.3	3.7 - 5.0
1.0 Mz-Caudal Aumentado	31	50	46.5	29.8	2.8 - 3.8	2.7 - 3.3	2.6 - 3.6	2.5 - 3.1	5.1 - 6.7

3. Opciones Tecnológicas del Mercado Solar en Guatemala

El análisis de la oferta tecnológica en Guatemala es un paso clave para garantizar que las soluciones de riego seleccionadas respondan de manera óptima a las condiciones del proyecto. Durante la investigación de mercado se identificaron trece empresas dedicadas al diseño, venta e instalación de sistemas de riego en el país. Sin embargo, solo cinco de ellas incorporan energía solar dentro de sus servicios, y de ese grupo únicamente tres presentan propuestas que pueden considerarse viables para las necesidades técnicas y económicas de este proyecto.

Para lograr esta caracterización se realizaron entrevistas directas con representantes de las compañías, a fin de conocer con mayor precisión las tecnologías que utilizan, los alcances de sus servicios, sus condiciones de garantía y su experiencia en campo.

3.1. Panorama del mercado local e internacional

El mercado guatemalteco de bombeo solar para riego evoluciona en sintonía con las tendencias internacionales, que privilegian la eficiencia energética, la automatización y el monitoreo remoto. En países de la región y del mundo se ha generalizado el uso de variadores de frecuencia diseñados para bombeo fotovoltaico, así como sensores de nivel y de presión y plataformas digitales que permiten supervisar el sistema en tiempo real. Estas innovaciones comienzan a incorporarse en Guatemala.

3.1.1. Distribuidores e instaladores identificados

Los proveedores e instaladores de sistemas de bombeo solar identificados corresponden a empresas con cobertura nacional, acostumbradas a trabajar tanto en regiones de fácil acceso como en zonas de difícil logística. Su cartera de clientes abarca desde pequeños agricultores y cooperativas rurales hasta proyectos industriales, pecuarios y de abastecimiento municipal, lo que les permite acumular experiencia en contextos muy diversos.

Estos operan bajo un modelo integral de “llave en mano”, en el que asumen el diseño, la compra de equipos, la instalación y la puesta en marcha del sistema. En la etapa de ingeniería emplean herramientas de dimensionamiento propias o de fabricantes para calcular los requerimientos de potencia y caudal según las características hidráulicas de cada sitio. Durante la ejecución, suministran e instalan los módulos fotovoltaicos, las estructuras metálicas, los controladores y variadores de frecuencia, las bombas sumergibles y el cableado necesario, incorporando las protecciones eléctricas y la puesta a tierra para minimizar riesgos por descargas.

El servicio posventa es un componente valorado de su oferta. Aún cuando los planes formales de mantenimiento varían, es común que se contemple al menos una visita de seguimiento o mantenimiento preventivo durante el primer año. Los tiempos de respuesta ante fallas oscilan, en promedio, entre tres días y dos semanas, dependiendo de la ubicación del proyecto y de la complejidad de la reparación.

En cuanto a capacidades técnicas, el mercado nacional ya maneja un rango amplio que va desde bombas en corriente continua de 1 HP, adecuadas para riego por goteo o abrevaderos, hasta equipos trifásicos de 20 HP e incluso superiores, aptos para riego de gran escala. Estas soluciones pueden operar en pozos de hasta 85 metros de carga dinámica total (CDT), lo que las hace

compatibles con buena parte de las condiciones hidrogeológicas del país. La combinación de bombas en corriente continua y alterna ofrece flexibilidad para proyectos sin acceso a red eléctrica o para fincas que buscan reducir su factura energética manteniendo bombas existentes.

Las garantías suelen alinearse con estándares internacionales: alrededor de 10 años para los paneles fotovoltaicos, dos años para las bombas y un año para la instalación, con recomendaciones explícitas de incorporar protecciones adecuadas para prevenir daños por tormentas eléctricas. En materia de financiamiento, se observan esquemas que van desde ventas de contado hasta acuerdos de pago en cuotas, e incluso la participación de instituciones microfinancieras o cooperativas cuando los proyectos se orientan a pequeños productores.

Finalmente, una tendencia emergente es el monitoreo remoto, cada vez más solicitado para optimizar el uso del agua y anticipar fallas. Sin embargo, su implementación todavía depende de la calidad de la conectividad celular en cada región. Otro aspecto a considerar es que, si bien estas empresas dominan el bombeo solar, la provisión de tanques de almacenamiento o la red de riego suele quedar fuera de su alcance, por lo que se recomienda coordinar estas partes con proveedores especializados.

En conjunto, el mercado guatemalteco muestra una capacidad técnica consolidada para diseñar e instalar sistemas de bombeo solar de distintas escalas, combinando experiencia práctica, conocimiento de las condiciones locales y un enfoque de servicio integral.

3.1.2. Productos de bombeo solar en Guatemala

En Guatemala, el mercado de bombas solares para riego está concentrado exclusivamente en tres marcas (tres tecnologías): Lorentz, Solartech y Difful. Cada una cubre distintos niveles de inversión y desempeño, lo que permite atender desde pequeños sistemas de riego hasta proyectos de gran escala.

- Lorentz, de origen alemán, se posiciona como la opción de más alta calidad y confiabilidad. Sus equipos están diseñados específicamente para trabajar con energía solar, integran controladores inteligentes y variadores de frecuencia, y facilitan el monitoreo remoto del caudal, la presión y el consumo energético. Gracias a su representación formal en Guatemala, ofrecen garantía de fábrica, repuestos y soporte técnico especializado, lo que la hace ideal para proyectos de riego de gran capacidad o para aplicaciones que requieren supervisión continua.
- Solartech constituye una alternativa adecuada para explotaciones agrícolas y pecuarias de tamaño medio. Sus bombas se caracterizan por un buen equilibrio entre eficiencia energética y costo de inversión, y pueden configurarse para operar tanto en corriente continua como en corriente alterna, lo que amplía su rango de aplicaciones. La disponibilidad de piezas de repuesto y asistencia técnica local contribuye a su confiabilidad en entornos rurales.
- Difful ofrece bombas de origen asiático que han ganado aceptación por su precio competitivo y disponibilidad inmediata. Aunque requieren una instalación cuidadosa y mantenimiento regular para garantizar su vida útil.

Estas marcas de bombas solares, las identificadas actualmente en el país, cubren un amplio espectro de necesidades y presupuestos, desde soluciones de bajo costo hasta sistemas tecnificados de alta capacidad. Su presencia asegura la disponibilidad de repuestos y soporte técnico en Guatemala, aspecto esencial para la sostenibilidad de los proyectos de riego con energía solar.

3.1.2.1. Bombas Lorentz - Serie PS1 y PS2

Lorentz desarrolla equipos concebidos desde su origen para operar con energía solar fotovoltaica, integrando controladores electrónicos de última generación y opciones avanzadas de monitoreo. Para el proyecto en análisis, las series PS1 y PS2 son las que mejor se ajustan a los requerimientos de caudal y carga dinámica total (CDT) identificados durante las visitas de campo.

Las dos líneas cumplen funciones complementarias dentro del abanico de necesidades del proyecto:

- Serie PS1: soluciones compactas, de baja potencia, adecuadas para pequeñas parcelas agrícolas, riego por goteo y escenarios donde se requieren caudales bajos y cargas dinámicas (CDT) reducidas. Su diseño eficiente, accesible y confiable, junto con la menor potencia fotovoltaica requerida, las convierte en alternativas apropiadas para diversos casos observados en campo.
- Serie PS2: sistemas modulares de mayor capacidad, compuestos por bomba, motor, controlador y sensores, diseñados para maximizar el bombeo con energía solar. Su arquitectura permite arranque suave, protección eléctrica completa y operación eficiente incluso con radiación solar variable, lo cual es clave en días parcialmente nublados.

Las características técnicas principales de la serie PS1 incluyen:

- Potencias típicas entre 0.15 y 0.75 kW, adecuadas para riego por goteo, huertos y abastecimiento básico de agua.
- Motores DC sin escobillas con alta eficiencia energética ($\approx 87\%$), combinados con controladores optimizados para operación solar directa, lo que permite maximizar caudal en función de la radiación disponible.
- Pump-ends de alto desempeño, incluyendo opciones centrífugas (S1-700) con impulsores poliméricos de larga vida y opciones helicoidales (rotor progresivo) en el modelo S1-200, diseñadas para extender las horas de operación para bajas potencias.
- Arranque suave y protección integrada contra sobrecargas, trabajo en seco, baja radiación y variaciones de voltaje.
- Operación eficiente con baja radiación, permitiendo mantener caudales útiles en mañanas tempranas, tardes y días parcialmente nublados.
- Amplia compatibilidad con fuentes de agua, pudiendo operar desde pozos, ríos, lagos, estanques, arroyos, reservorios e incluso tanques, lo que las hace altamente versátiles para distintas comunidades.
- Instalación simple (“plug & play”), especialmente en los modelos más pequeños, lo que reduce tiempos de montaje, facilita el mantenimiento y mejora la confiabilidad del sistema.
- Capacidad de monitoreo y control en tiempo real mediante la aplicación S-Connect (iPhone/Android), que permite visualizar caudal, potencia, estado del sistema y alarmas, reforzando la operación segura y el mantenimiento preventivo.
- Construcción en acero inoxidable, con componentes anticorrosivos y durables, adecuados para ambientes rurales.
- Compatibilidad con sensores de nivel y tanque, permitiendo automatizar el bombeo e integrar sistemas de almacenamiento para riego nocturno o por gravedad.
- Repuestos y soporte local disponibles debido a la presencia consolidada de Lorentz en Guatemala.

La arquitectura hidráulica y eléctrica de la serie PS1 permite cubrir los rangos de demanda observados en los perfiles de las comunidades estudiadas, donde la CDT es baja a moderada ($\approx 10-35$ m).



Figura 2. Modelos relevantes de la serie PS1 para este proyecto.

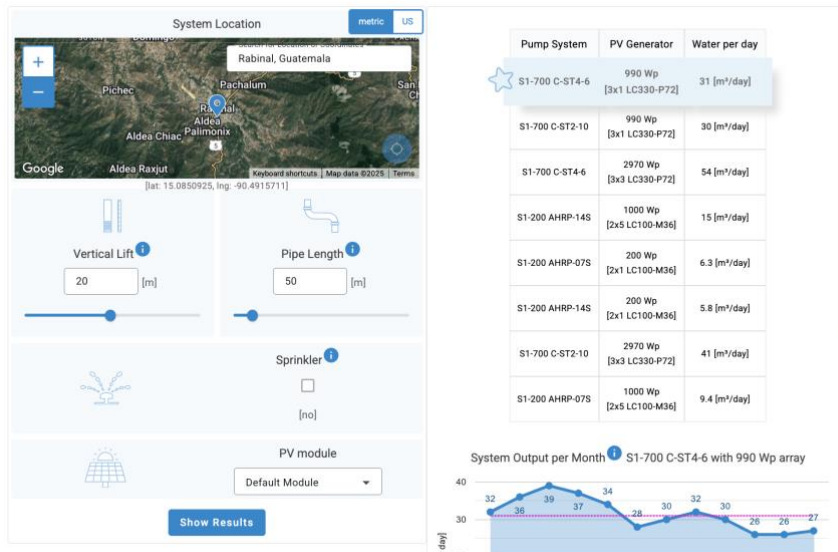


Figura 3. Dimensionamiento en línea y selección de bomba de la serie PS1 para el bombeo de extracción del pozo al estanque intermedio con un CDT de 20 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.⁴

⁴ Lorentz <https://www.lorentz.de/s/sizing/>

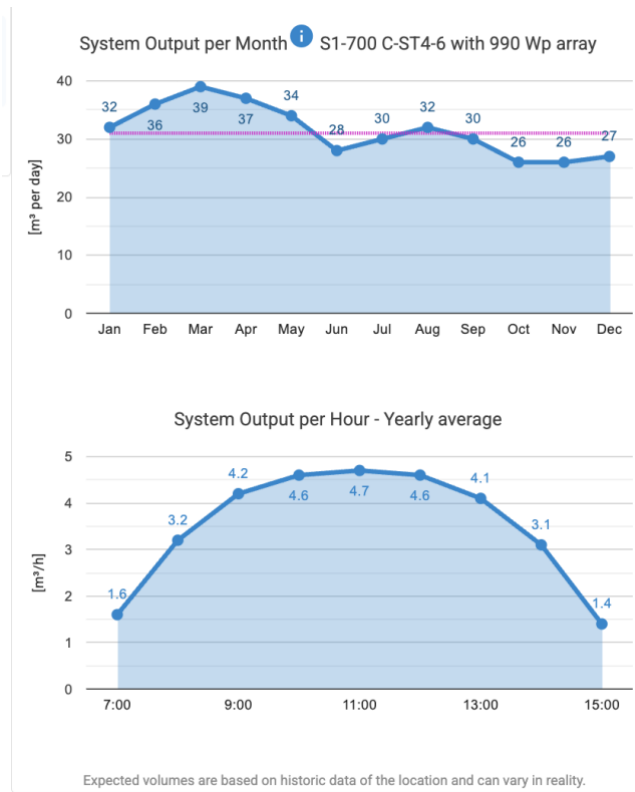


Figura 4. Producción diaria mensual y horaria esperada de PS1-700 para un CDT de 20 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.

System Location metric US

Vertical Lift [m]

Pipe Length [m]

Sprinkler [no]

PV module: Default Module

Show Results

Pump System	PV Generator	Water per day
S1-700 C-ST4-6	990 Wp [3x1 LC330-P72]	70 [m³/day]
S1-200 AHRP-23S	200 Wp [2x1 LC100-M36]	17 [m³/day]
S1-200 AHRP-14S	200 Wp [2x1 LC100-M36]	15 [m³/day]
S1-700 C-ST4-6	2970 Wp [3x3 LC330-P72]	92 [m³/day]
S1-200 AHRP-23S	1000 Wp [2x5 LC100-M36]	28 [m³/day]
S1-200 AHRP-07S	200 Wp [2x1 LC100-M36]	9.7 [m³/day]
S1-200 AHRP-14S	1000 Wp [2x5 LC100-M36]	20 [m³/day]
S1-200 AHRP-07S	1000 Wp [2x5 LC100-M36]	12 [m³/day]

System Output per Month S1-200 AHRP-23S with 1000 Wp array

Month	Output [m³/day]
Jan	28
Feb	29
Mar	29
Apr	29
May	29
Jun	29
Jul	30
Aug	30
Sep	29
Oct	28
Nov	27
Dec	27

Figura 5. Dimensionamiento y selección de bomba de la serie PS1 para el bombeo desde los estanques a nivel del suelo hasta el área de cultivo con un CDT de 6 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.

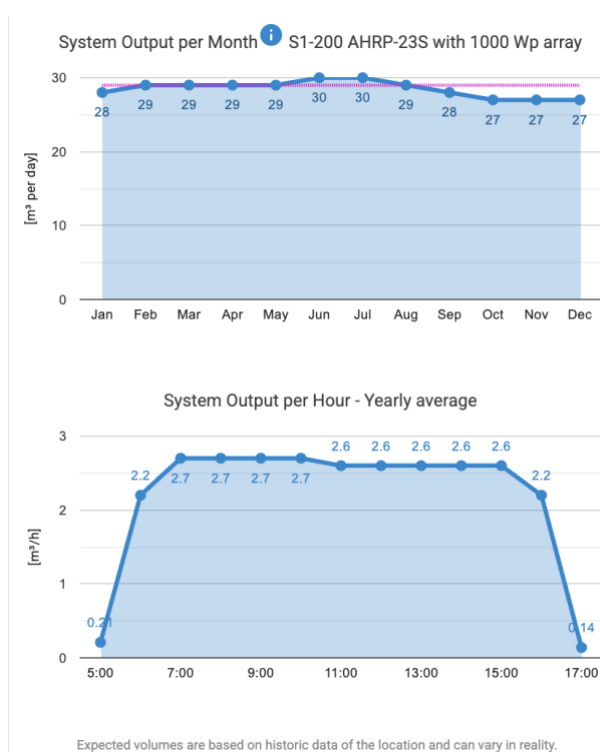


Figura 6. Producción diaria mensual y horaria esperada de PS1-200 para un CDT de 6 m y una longitud de tubería de 50 m en el Rabinal, Guatemala.

Las características técnicas principales de la serie PS2 incluyen:

- Amplio rango de potencias, desde aplicaciones pequeñas (alrededor de 0.5 HP) hasta sistemas de gran capacidad que superan los 15 - 20 HP, lo que permite cubrir desde riego por goteo en pequeñas parcelas hasta riego a gran escala.
- Capacidad para bombeo profundo, con cargas dinámicas que pueden superar los 80 metros sin comprometer el caudal requerido.
- Controlador inteligente que ajusta la velocidad de la bomba en tiempo real, maximizando el caudal en función de la radiación disponible y protegiendo el equipo frente a variaciones de voltaje.
- Sensores de nivel y presión que facilitan el control automático de llenado de tanques y evitan trabajo en seco.
- Compatibilidad con monitoreo remoto, a través de comunicaciones móviles o vía internet, que permite registrar parámetros de operación, anticipar fallas y planificar mantenimientos.

Dentro de la serie PS2 existe una gama de modelos que cubren diferentes demandas de caudal y altura, lo que brinda flexibilidad de diseño para ajustarse a las condiciones específicas de cada proyecto.

Tabla 3. Modelos de la serie PS2 de bombas Lorentz relevantes para este proyecto.

Modelo	Tipo de bomba / Punto fuerte	Caudal máximo estimado / Altura máxima aproximada*
PS2-150 C-SJ-5-8	Sumergible centrífuga	Caudales medios; altura moderada (≈20-30 m).
PS2-150 AHR-04S / HR-07S	Rotor helicoidal	Adecuadas para alturas mayores (~60 m) con caudales medios.
PS2-200 C-SJ3-9	Sumergible centrífuga	Mayor caudal que las de 150; altura moderada (~30-40 m).
PS2-600 HR/C	Alta capacidad	Diseñadas para alturas mayores y flujos superiores.
PS2-1800 HR/C	Muy alta capacidad	Para grandes demandas de volumen y altura.
PS2-4000 HR/C	Máxima capacidad	Indicadas para proyectos de riego de gran escala.

* La "altura máxima aproximada" corresponde a la carga dinámica total (CDT) que cada modelo puede manejar de manera eficiente, según las fichas técnicas de la marca.

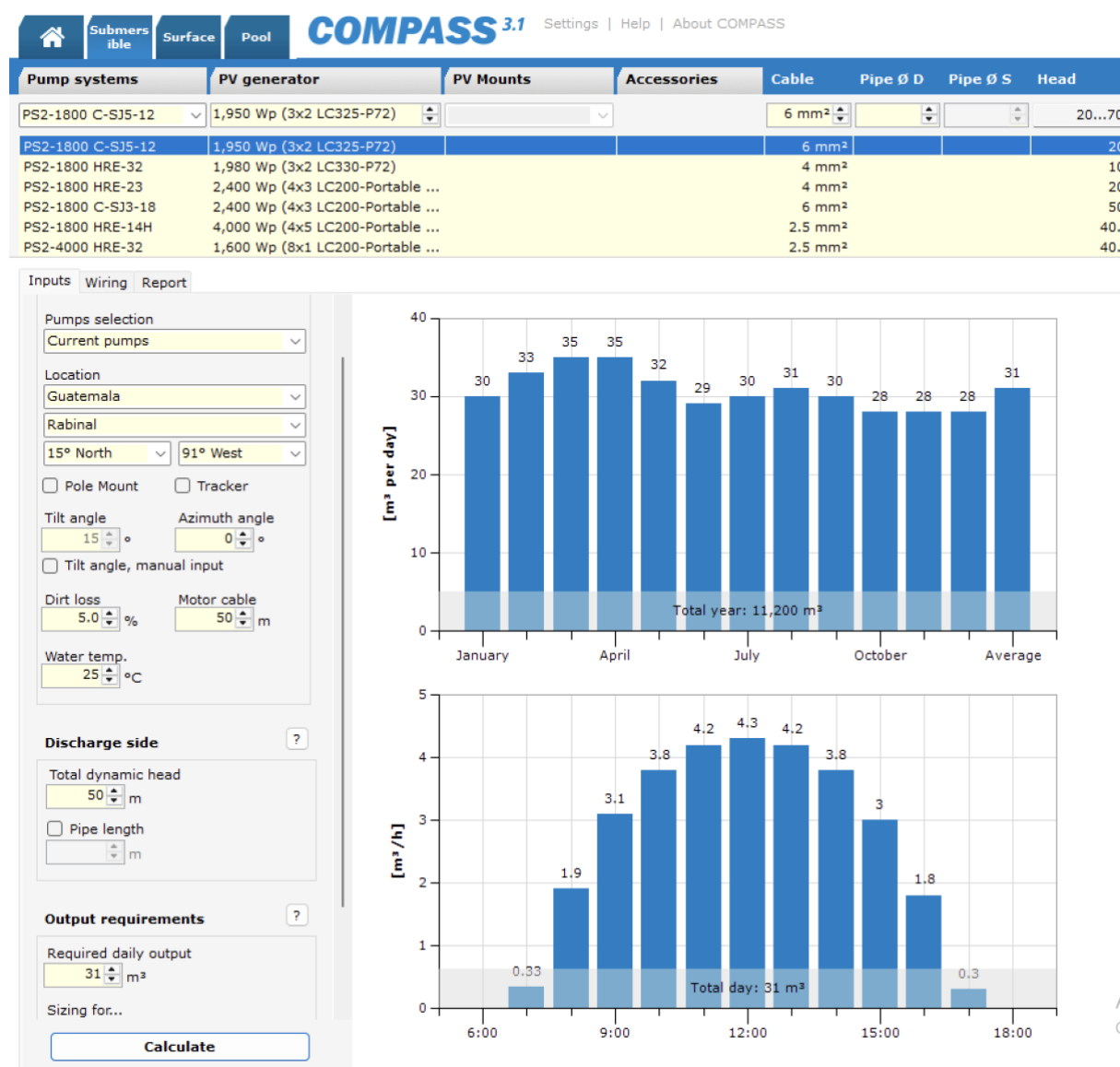


Figura 7. Dimensionamiento en Compass, la plataforma de Lorentz para la extracción de agua a una CDT de 50 m y una demanda diaria de 31 m³/día.

E4. Selección de Tecnologías

La robustez y durabilidad de la serie PS2, junto con la disponibilidad de repuestos y servicio técnico local, son factores decisivos para proyectos de largo plazo. Estas bombas se integran sin dificultad a redes de riego existentes o a sistemas nuevos, incluyendo riego por aspersión, goteo y almacenamiento en tanques para distribución por gravedad.

Tabla 4. Bombas solares PS2 Lorentz adecuadas para el riego de 0.35 ha de cultivo de maíz en temporada seca para CDT mayores.

Diseño	Caudal1 (m³/d)	CDT1 (m)	Bomba	Caudal2 (m³/d)	CDT2 (m)	Bomba
0.5 Mz-Caudal Base	15.5	50	<ul style="list-style-type: none"> PS2-600 C-SJ3-9 PS2-1800 HR-23 PS2-1800 C-SJ5-12 	15.5	16.3	<ul style="list-style-type: none"> PS2-600 HRE-14 PS2-1800 HRE-14
0.5 Mz-Caudal Aumentado	15.5	50		23.3	19.1	
1.0 Mz-Caudal Base	31	50	<ul style="list-style-type: none"> PS2-1800 HR-23 PS2-1800 C-SJ5-12 PS2-4000 C-SJ8-15 	46.5	21.2	<ul style="list-style-type: none"> PS2-1800 HRE-14 PS2-1800 HRE-23 PS2-1800 C-SJ5-12
1.0 Mz-Caudal Aumentado	31	50	<ul style="list-style-type: none"> PSk2-7 C-SJ12-15 PSk2-9 C-SJ8-44 	46.5	29.8	<ul style="list-style-type: none"> PS2-1800 HRE-23 PS2-1800 C-SJ5-12

PS2-600 HRE-10

Sistema de bomba inmersa para pozos de 4"

Características del sistema

Altura max. 80 m
Flujo max. 2.0 m³/h

Datos técnicos

Controlador PS2-600

- Controlar y supervisar
- Entradas de control para protección contra operación en seco, control remoto, etc.
- Protección contra polaridad reversa, sobre carga y temperatura excesiva
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) integrado
- Funcionamiento con batería: protección integrada contra descarga total

Potencia max. 0.70 kW
Voltaje de entrada max. 150 V
Óptimo Vmp max. 68 V
Corriente motor max. 13 A
Eficiencia max. 98 %
Temper. del ambiente -40...50 °C
Clase de protección IP68

Motor ECDRIVE 600-HRE

- Motor CD sin escobillas - libre de mantenimiento
- Unidad de agua
- Materiales Premium, acero inoxidable AISI 304/316
- Sin elementos electrónicos en el motor

Potencia nominal 0.70 kW
Eficiencia max. 92 %
Revoluciones motor 900...3.300 rpm
Clase de aislamiento F
Clase de protección IP68
Inmersión max. 150 m

Cabeza de bomba PE HRE-10***

- Válvula de retorno
- Materiales Premium, acero inoxidable AISI 304/316
- Bomba helicoidal

Eficiencia max. 67 %

Unidad de bomba PU600 HRE-10 (Motor, Cabeza de bomba)

Diámetro de perforación min. 4.0 in
Temperatura del agua max. 50 °C

Normas

2006/42/EC, 2004/10/EC, 2006/95/EC
IECEN 61702-1995, IECEN 62203 Ed.1



PS2-1800 C-SJ5-12

Solar Submersible Pump System for 4" wells

System Overview

Head max. 70 m
Flow rate max. 7.8 m³/h

Technical Data

Controlador PS2-1800

- Controlling and monitoring
- Control inputs for dry running protection, remote control etc.
- Protected against reverse polarity, overload and overtemperature
- Integrated MPPT (Maximum Power Point Tracking)
- Battery operation: integrated low-voltage disconnect
- Integrated Sun Sensor

Power max. 1.8 kW
Input voltage max. 200 V
Óptimo Vmp max. 102 V
Motor current max. 14 A
Efficiency max. 98 %
Ambient temp. -40...50 °C
Enclosure class IP68

Motor ECDRIVE 1200-C / ECDRIVE 1800-C

- Motor-science-free permanent DC motor
- Water filled
- Premium materials, stainless steel: AISI 304/316
- No electronics in the motor

Rated power 1.7 kW
Efficiency max. 92 %
Motor speed 900...3.300 rpm
Insulation class F
Enclosure class IP68
Submersion max. 150 m

Pump Unit PU1800 C-SJ5-12 (Motor, Pump End)

Borehole diameter min. 4.0 in
Water temperature max. 50 °C

Standards

2006/42/EC, 2004/10/EC, 2006/95/EC
IECEN 61702-1995, IECEN 62203 Ed.1



Figura 8. Especificaciones técnicas de las bombas PS2 seleccionadas para CDTs mayores.

3.1.2.2. Bombas Solartech

En Guatemala, Solartech representa una tecnología muy confiable en el mercado de bombas solares. Solartech ofrece productos con alto rendimiento, configuraciones versátiles y tecnologías modernas, sin llegar al costo premium de las marcas de alta gama, pero con más capacidades que las opciones básicas.

Características y tecnologías relevantes

- Solartech ofrece una gama de inversores que convierten directamente la energía fotovoltaica de los paneles a corriente alterna (AC) para alimentar bombas AC. Estos inversores incluyen seguimiento MPPT que ajusta la frecuencia de salida según la radiación solar, lo que mejora la eficiencia operativa cuando la radiación fluctúa.
- La línea SPM usa motores PM (Permanente Magnet) sin escobillas, lo que permite mayor eficiencia energética, menor desgaste y reducir el número de paneles solares necesarios para cierta capacidad.

E4. Selección de Tecnologías

- Rango de potencia y altura de bombeo: Se encuentran modelos desde ~300W hasta varios kilowatts en la gama PM/SPM y CDT manejables de hasta ~100 m.
- Flujos de agua estimados: Varían mucho según modelo. Algunos productos muestran flujos de decenas a más de cien metros cúbicos al día, cuando la altura no es muy grande.
- Protección completa del sistema (protección contra sobrecarga, protección al funcionamiento en seco, etc.).
- Modelos con capacidad de monitoreo remoto.
- Opciones híbridas o respaldo.

Tabla 5. Bombas solares Solartech para el riego de 0.35 y 0.7 ha de cultivo de maíz en temporada seca.⁵

	Modelo	Altura de Bombeo Recomendada	Caudal Diario Recomendado	Arreglo Solar Recomendado
5	SPM31100S030S	73 - 18 m	8 - 30 m ³	330W/36V × 4PCS × 1String = 1320W
6	SPM31500S030S	93 - 30 m	10 - 30 m ³	330W/36V × 3PCS × 2Strings = 1980W
8	SPM31100S035S	56 - 18 m	15 - 35 m ³	330W/36V × 4PCS × 1String = 1320W
9	SPM31500S040S	69 - 20 m	18 - 40 m ³	330W/36V × 3PCS × 2Strings = 1980W
21	SPM31500C040S	71 - 26 m	20 - 40 m ³	330W/36V × 3PCS × 2Strings = 1980W
23	SPM31500C045S	42 - 29 m	35 - 45 m ³	330W/36V × 3PCS × 2Strings = 1980W

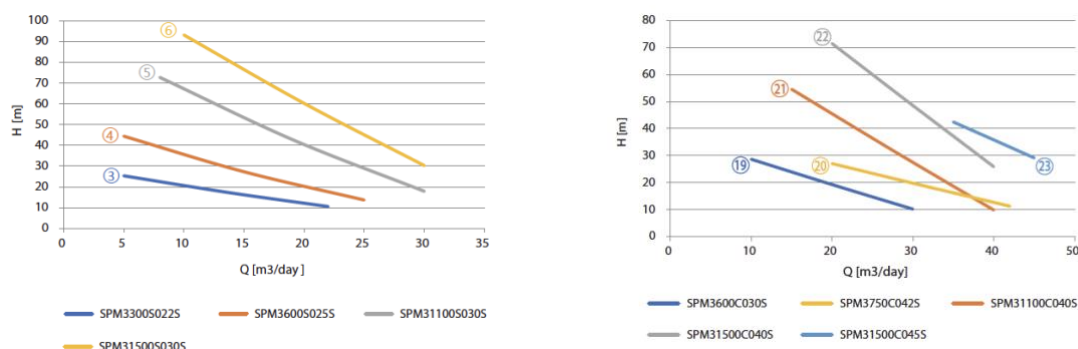


Figura 9. Curvas de desempeño de bombas Solartech de la serie SPM.

⁵ <https://www.solartech.cn/vancheerfile/files/2025/2/20250228112431484.pdf>

Solartech Solar Pump

Performance	
Water Head	73 - 18 m
Daily Water Flow	8 - 30 m ³
Technical Data	
Pump Specifications	110V 4000rpm
Pump Outlet Dia.	1"1/4
Adapting Well Dia.	100 mm
Solar Pumping Inverter Model	PM1100S
Inverter Power	1100 W
Max. DC Input Voltage	200 V
Recommended MPP Voltage	> 120V
Inverter Ambient Temperature	-20 ~ 60 °C
Pump Model	SPM3-3-1.1S
Motor Power	1100 W
Pump Enclosure Class	IP68
Ambient Water pH Range	6.5 - 8.0
Ambient Water Temperature	1 - 35 °C



Figura 10. Especificaciones técnicas de la SPM31100S030S, bomba seleccionada para el proyecto por su potencial de trabajo en el rango de CDTs y caudales requeridos para el proyecto.

3.1.2.3. Bombas Difful

Difful es la marca de acceso económico del mercado solar en Guatemala que ha logrado posicionarse gracias a su flexibilidad, variedad de modelos y precios competitivos. Su oferta incluye tanto bombas sumergibles como de superficie, con motores DC, híbridos AC/DC, y algunos modelos con motores “water-filled” (llenados de agua) que mejoran la durabilidad al reducir parte del sobrecalentamiento interno.

Características y tecnologías destacadas

- Difful fabrica bombas solares capaces de operar a profundidades significativas; algunos modelos “shielded water-filled motor solar pump” que alcanzan hasta 150 metros de profundidad de pozo.
- Utilizan motores DC sin escobillas y tecnología MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) en el controlador para optimizar la generación eléctrica de los paneles fotovoltaicos. Esto permite que la bomba trabaje mejor en condiciones de irradiación variable, lo que es importante en zonas con nubosidad parcial o en estaciones menos soleadas.
- Ofrecen modelos híbridos AC/DC, lo que brinda mayor flexibilidad en sitio cuando hay red eléctrica disponible o cuando el sistema se usa como respaldo.

Sin embargo, podrían haber algunas limitaciones que sólo ser verificarán con una presencia de mayor tiempo en el mercado.

- Rendimiento menor bajo condiciones de baja irradiación, o cuando se trabaja con CDT grandes.
- Calidad de componentes y garantías pueden variar entre modelos; algunos modelos requieren más supervisión y mantenimiento para evitar problemas (como desgaste de sellos, protección al funcionamiento en seco, etc.).
- Servicio postventa y disponibilidad de repuestos pueden ser más lentos o menos estandarizados en modelos menos comunes.

E4. Selección de Tecnologías

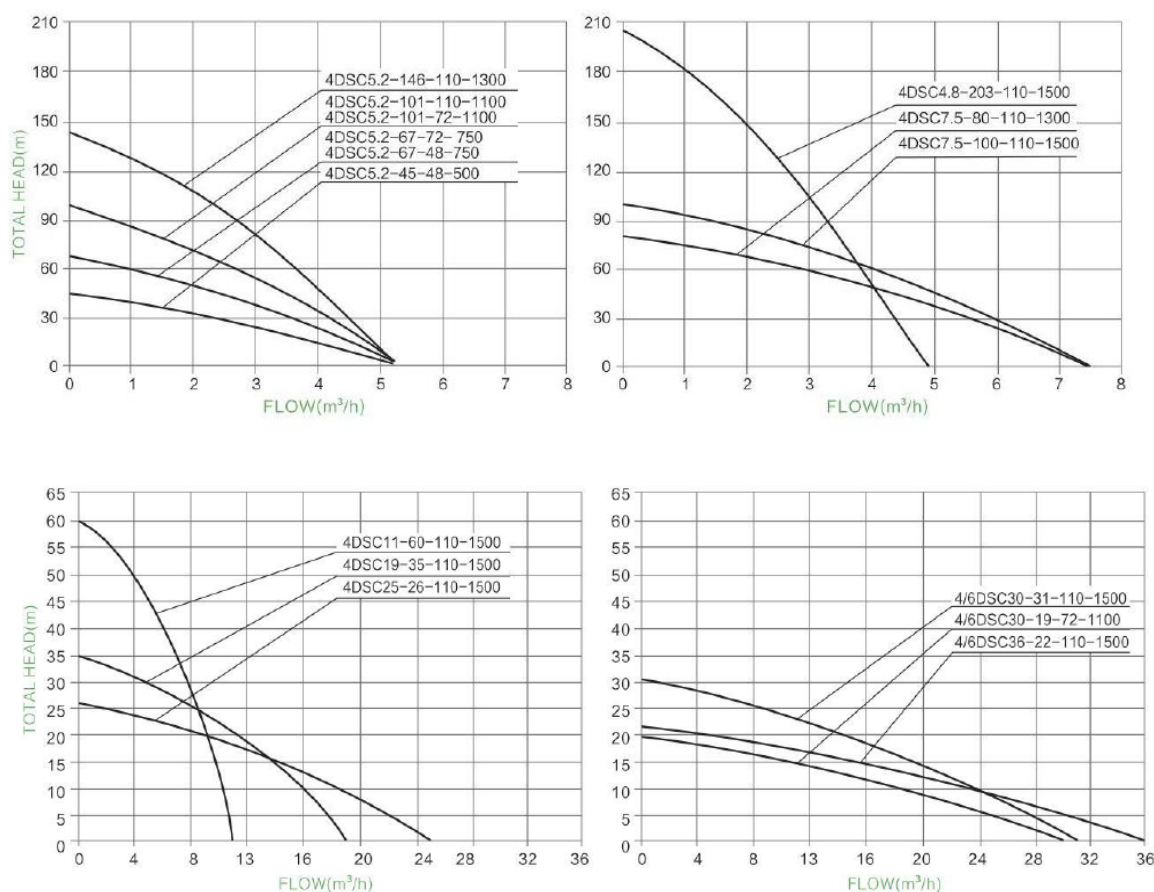


Figura 11. Curvas de desempeño hidráulico de bombas Difful con potencial para su implementación en el proyecto.⁶

3.2. Economías de escala y estandarización tecnológica

En esta fase del proyecto se han identificado bombas solares de alta calidad, con desempeño comprobado a nivel internacional, que cumplen con criterios de eficiencia, durabilidad y compatibilidad con condiciones agroclimáticas similares a las de Guatemala. La incorporación de estas tecnologías como soluciones estandarizadas en el país no solo garantiza confiabilidad operativa, sino que también habilita economías de escala. Específicamente, si estas bombas son aceptadas y adoptadas ampliamente a nivel nacional en proyectos de mayor alcance, se generarán reducciones significativas en los costos unitarios debido a la compra en volumen, la estandarización en la logística de instalación y mantenimiento, y la consolidación de cadenas de suministro. Este enfoque facilitará una implementación más rentable y replicable, maximizando el impacto del proyecto y reduciendo las barreras de entrada para futuros usuarios.

⁶ <https://es.diffulpump.com/oid1751493/pages.htm>

4. Análisis Económico

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis económicos desarrollados para tres configuraciones de Sistemas de Bombeo Solar para Riego, con el objetivo de evaluar su factibilidad de implementación, estimar la necesidad y el nivel adecuado de subsidios, e identificar los factores económicos críticos que condicionan la sostenibilidad de los proyectos en el corto, mediano y largo plazo.

Los análisis se realizan de manera específica para cada sitio, dado que las configuraciones tecnológicas y los resultados económicos dependen directamente de las condiciones locales. Entre los principales factores considerados se incluyen la calidad y tipo de infraestructura existente, la profundidad y productividad del pozo, la disponibilidad hídrica, la topografía del terreno, el acceso a la red eléctrica y la productividad agrícola esperada, entre otros. En consecuencia, los resultados presentados no deben interpretarse como valores universales, sino como referencias técnicas adaptadas a contextos representativos.

El objetivo general del proyecto es promover la adopción progresiva de tecnologías solares en el sector agrícola. Si bien se reconoce que, durante las etapas iniciales de adopción, pueden requerirse niveles de subsidio relativamente elevados para facilitar el acceso de los pequeños productores, se prevé que esta dependencia disminuya gradualmente a medida que la tecnología se consolide, se reduzcan los costos unitarios y aumenten las capacidades locales de operación y mantenimiento.

En particular, el análisis se orienta a identificar las soluciones tecnológicas más adecuadas para pequeños productores que cultivan superficies menores a 2 manzanas (1.4 ha), promoviendo la estandarización de configuraciones y la generación de economías de escala que permitan reducir los costos de la infraestructura solar y mejorar su accesibilidad. Paralelamente, se espera que el fortalecimiento de capacidades de los agricultores y el aumento de la demanda contribuyan a dinamizar la oferta de servicios, fomentando la competencia entre proveedores, la calidad de las instalaciones y un servicio técnico adecuado, elementos clave para la sostenibilidad de los sistemas SPIS.

4.1. Invest_Payback Tool

Para efectuar el análisis financiero, se utilizó la herramienta *SPIS Toolbox*, el componente de la herramienta correspondiente a Inversión y Tiempo de Repago (*Invest_Payback Tool*). Esta herramienta permite hacer una evaluación comparativa entre los ingresos y tres opciones diferentes de bombeo de riego: “Solar-powered irrigation system (SPIS)”, “Grid-powered irrigation system”, y “Diesel-powered irrigation system”.⁷ Para el presente análisis sólo se utilizó la opción de “Solar-powered irrigation system”.

⁷ https://energypedia.info/wiki/Toolbox_on_SPIS

La información necesaria para su uso incluye los costos de inversión y operación de los diferentes sistemas de bombeo, los ingresos previstos de la producción agrícola y las condiciones económicas básicas, como tasa de inflación, subsidio, etc.

Para la simulación se utilizaron costos de equipo actualizados en el mercado de Guatemala, obtenidos de información de distribuidores de equipo solar de bombeo.

Se realizaron simulaciones variando parámetros económicos relevantes para obtener como resultado los indicadores de Valor Presente Neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), periodo de repago de la deuda y periodo de recuperación de la inversión, entre otros.

4.2. Metodología

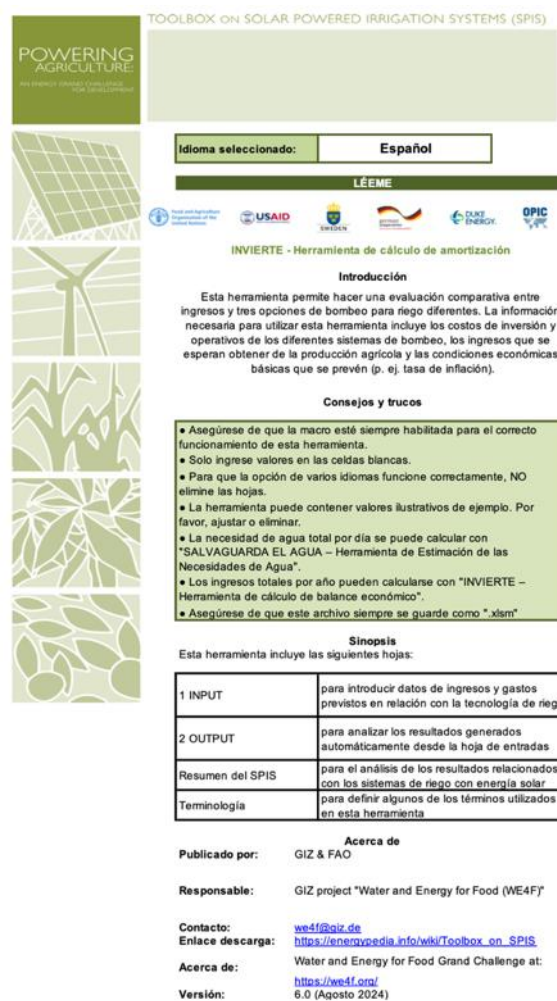
Para evaluar la viabilidad financiera de los sistemas de bombeo solar, se desarrollaron múltiples simulaciones económicas que combinan los siguientes parámetros y variables económicas que influyen en el desempeño del SPIS.

- Inflación y tasa de descuento.
- Ingreso anual del productor.
- Margen de ganancia agrícola y variación esperada en precios de cultivos.
- Porcentaje de reinversión anual.
- Inversión inicial requerida según la configuración técnica del sistema.
- Niveles de subsidio.
- Condiciones de financiamiento: monto del préstamo, tasa de interés y período de pago.

En esta etapa el análisis se limita al costo del bombeo solar, ya que es necesario examinar por separado el impacto de costos de los diferentes componentes. Los costos del sistema de riego se incorporarán más adelante, una vez completada esta primera evaluación.

En cada simulación se calcularon los indicadores económicos estándar: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (IRR), período de recuperación y cuota mensual del préstamo. Las celdas resaltadas en verde en la tabla resumen indican los cambios aplicados en cada escenario con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo ante variaciones en los principales parámetros.

Desde el punto de vista económico, un escenario se considera financieramente factible cuando el VPN es positivo y la IRR supera la tasa de descuento utilizada, lo que indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que además genera un retorno superior al costo del capital. En este contexto, el período de recuperación y la cuota mensual del préstamo permiten complementar el análisis, incorporando criterios de liquidez y capacidad de pago relevantes para los usuarios finales.



TOOLBOX ON SOLAR POWERED IRRIGATION SYSTEMS (SPIS)

Idioma seleccionado: **Español**

LÉEME

USAID SIDA OPIC

INVIERTE - Herramienta de cálculo de amortización

Introducción

Esta herramienta permite hacer una evaluación comparativa entre ingresos y tres opciones de bombeo para riego diferentes. La información necesaria para utilizar esta herramienta incluye los costos de inversión y operativos de los diferentes sistemas de bombeo, los ingresos que se esperan obtener de la producción agrícola y las condiciones económicas básicas que se prevén (p. ej. tasa de inflación).

Consejos y trucos

- Asegúrese de que la macro esté siempre habilitada para el correcto funcionamiento de esta herramienta.
- Solo ingrese valores en las celdas blancas.
- Para que la opción de varios idiomas funcione correctamente, NO elimine las hojas.
- La herramienta puede contener valores ilustrativos de ejemplo. Por favor, ajustar o eliminar.
- La necesidad de agua total por día se puede calcular con "SALVAGUARDA EL AGUA - Herramienta de Estimación de las Necesidades de Agua".
- Los ingresos totales por año pueden calcularse con "INVIERTE - Herramienta de cálculo de balance económico".
- Asegúrese de que este archivo siempre se guarde como ".xsm"

Sinopsis

Esta herramienta incluye las siguientes hojas:

1 INPUT	para introducir datos de ingresos y gastos previstos en relación con la tecnología de riego
2 OUTPUT	para analizar los resultados generados automáticamente desde la hoja de entradas
Resumen del SPIS	para el análisis de los resultados relacionados con los sistemas de riego con energía solar
Terminología	para definir algunos de los términos utilizados en esta herramienta

Acerca de

Publicado por: GIZ & FAO

Responsable: GIZ project "Water and Energy for Food (WE4F)"

Contacto: we4f@giz.de

Enlace descarga: https://energypedia.info/wiki/Toolbox_on_SPIS

Acerca de: Water and Energy for Food Grand Challenge at: <https://we4f.org/>

Versión: 6.0 (Agosto 2024)

4.2.1. Parámetros económicos

Inflación

Para determinar la tasa de inflación en Guatemala se consultó la información del Banco de Guatemala⁸ para el periodo 2018 a 2025. Para este estudio se adoptó un valor de inflación conservador del 2.7%, el cual refleja la estabilidad macroeconómica de Guatemala sin asumir escenarios excesivamente optimistas como los reportados para 2025. Esta aproximación permite evaluar la viabilidad del proyecto bajo condiciones prudentes y más representativas del comportamiento histórico.

Tabla 6. Inflación en Guatemala.

Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (1)
Inflación	3.76%	3.71%	3.21%	4.28%	6.87%	6.27%	2.88%	1.57

Nota: Para 2025 se presenta el promedio de enero a noviembre

Tasa de descuento

A pesar de que el proyecto contempla subsidios iniciales significativos, el análisis financiero ha sido realizado utilizando una tasa de descuento del 12%, con el objetivo de evaluar la viabilidad y sostenibilidad del sistema desde una perspectiva a largo plazo y autosostenible. Además, esta tasa permite anticipar escenarios futuros en los que se busque escalar o replicar la tecnología sin subsidios externos, fortaleciendo la resiliencia financiera del modelo. El enfoque es consistente con buenas prácticas en proyectos de transición energética, donde los subsidios se utilizan como herramienta de arranque, pero no como condición permanente para la operación del sistema.

Los parámetros económicos de inflación y tasa de descuento permanecen invariantes en todos los análisis presentados en este documento.

4.2.2. Variables económicas

Ingreso anual del productor

Para definir un parámetro de ingreso representativo para los agricultores beneficiarios, se revisaron diversas fuentes oficiales y se complementó la información con datos obtenidos durante el trabajo de campo.

En primer lugar, la FAO, en su publicación “Small Family Farms Country Factsheet: Economic Situation and Diversification”,⁹ reporta que una pequeña explotación familiar promedio en Guatemala obtuvo en 2018 un ingreso bruto de USD 6,772.3¹⁰. Al actualizar esta cifra a 2025 utilizando la inflación anual de Estados Unidos¹¹, se obtuvo un factor de ajuste de 1.323, con lo cual el ingreso actualizado asciende a USD 8,960. Aplicando el tipo de cambio promedio de 2025 (7.65 GTQ/USD), esto corresponde a aproximadamente GTQ 68,540.

⁸ <https://banquat.gob.gt/page/inflacion-total>

⁹ <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1fae548a-5a22-41fd-a576-fe2aa1f77d34/content>

¹⁰ Source: FAO. 2018. Smallholders data portrait (available at www.fao.org/family-farming/data-sources/dataportrait/farm-size/en).

¹¹ <https://datos.bancomundial.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG?locations=US>

Tabla 7. Inflación en Estados Unidos.

Año	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025 (1)
Inflación	2.4%	1.8%	1.2%	4.7%	8%	4.1%	2.9%	2.7%

Nota: Para 2025 se presenta el promedio de enero a noviembre

Asimismo, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), el salario mínimo agrícola mensual en 2021 fue de GTQ 2,292.4¹², equivalente a GTQ 35,904 anuales. Ajustado por la inflación acumulada de Guatemala entre 2021 y 2025, el valor actualizado es de GTQ 55,812 anuales, que puede utilizarse como un proxy conservador del ingreso agrícola.

A su vez, la Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos (ENEI)¹³ reporta que, para 2022, el ingreso promedio mensual de la categoría “patrón agrícola” fue de GTQ 7,046, equivalente a GTQ 84,552 anuales. Actualizado a 2025, este valor asciende a GTQ 100,382.

Durante el trabajo de campo se obtuvo también un caso de referencia particularmente útil: una familia agricultora de la Aldea Vega Chaperal, municipio de Rabinal, que cultiva 0.5 manzana con una combinación de maíz para autoconsumo y cultivos diversificados (cilantro, amaranto, cebollín, flor de jamaica, flor de muerto, orégano, yerbabuena, lechuga, acelga y epazote), complementados con un pequeño invernadero. La productora vende diariamente en el mercado local y reporta ingresos que pueden alcanzar hasta GTQ2,400 semanales, dependiendo de la demanda. Considerando 24 semanas efectivas de cosecha, esto equivale a un ingreso anual aproximado de GTQ57,600. Gracias al acceso permanente al agua y al invernadero, pueden iniciar ciclos productivos de manera continua. Además, la familia ha recibido apoyo del programa CARITAS de USAID, lo que ha fortalecido sus capacidades productivas.

Como se observa, las cifras provenientes de FAO, MAGA, INE y del trabajo de campo muestran variaciones significativas, lo que evidencia la heterogeneidad de los sistemas productivos rurales en Guatemala. Aun así, estos datos permitieron definir un escenario base para el parámetro de ingresos utilizado en el análisis económico. El modelo inició con un ingreso anual conservador de GTQ40,000, que posteriormente se ajustó en función de los distintos escenarios y de las variaciones identificadas tanto en la información de campo como en la bibliografía revisada.

En las simulaciones económicas se empleó un rango de ingresos entre GTQ 30,000 y GTQ 60,000, permitiendo evaluar la sensibilidad del modelo y determinar el ingreso mínimo necesario para que los indicadores financieros clave (VPN y TIR) resulten favorables. El valor conservador inicial para la modelación se fijó en GTQ 40,000, el cual se ajusta de acuerdo con los diferentes escenarios evaluados y la evidencia recopilada.

¹² Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala. El Agro en Cifras. Salario mínimo de la actividad agrícola del año 2017 al 2021 (cifras expresadas en GTQuetzales, pág. 13), según datos del Ministerio de Trabajo y Previsión Social -MINTRAB

<https://precios.maga.gob.gt/archivos/agro-en-cifras/EI%20Agro%20En%20Cifras%20-%202021.pdf>

¹³ Principales resultados de la Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos 2022-ENEI, publicada en febrero de 2023, pág. 51.

<https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2023/03/23/202303232142069Odm3oxU9mTY58hkborwzylm7MJop05q.pdf>

SPIS Toolbox 1. Parámetros económicos básicos para el análisis económico.

Supuestos básicos	
Moneda utilizada para el cálculo	<input type="text" value="GTQ"/> usar cualquier moneda
Inflación	<input type="text" value="2.7%"/> la tasa porcentual nacional de devaluación del dinero por año (recabada de las estadísticas nacionales)
Tasa de descuento	<input type="text" value="12.0%"/> la tasa anual utilizada para determinar el valor actual de futuros flujos de efectivo (truco: la tasa de descuento simplificada suele ser igual al tipo de interés devengado por las cuentas de ahorro bancario o bonos del tesoro)
Aumento del margen de beneficio anual	<input type="text" value="8%"/> la tasa con la que el agricultor aumentará los precios cada año (calculada según el propio registro)
Aumento anual del precio del combustible	<input type="text"/> la tasa con la que aumentará el precio del combustible (gasóleo, gasolina o GLP) cada año (según lo indicado por la autoridad reguladora nacional o a partir de las estadísticas nacionales sobre energía)
Aumento anual del precio de la electricidad	<input type="text"/> la tasa con la que aumentarán los precios del suministro eléctrico cada año (indicada por la autoridad reguladora nacional o la empresa de suministro eléctrico)
Tasa de agua (recargo por derechos de utilización del agua)	<input type="text" value="0.00"/> GTQ por m ³ el precio del agua por m ³ , determinado por el gobierno o la autoridad local, para utilizar los recursos hídricos compartidos con los propios sistemas de bombeo
Total de agua bombeada por día	<input type="text" value="16"/> m ³ por día conforme a los cálculos de "SALVAGUARDA EL AGUA – Herramienta de Estimación de las Necesidades de Agua" o a lo indicado por el proveedor de la bomba
Ingresos: Beneficio bruto de la explotación por año	<input type="text" value="50000"/> GTQ por año conforme a los cálculos de "INVIERTE - Herramienta de Cálculo del Balance Económico" o a partir de los propios registros
Porcentaje de beneficio a invertir	<input type="text" value="20%"/> % de beneficio disponible para invertir en sistema de bombeo de agua

4.1. Análisis económico 1: SPIS con rebombeo para el riego de 0.35 ha.

Este análisis económico corresponde a un sistema de riego solar para una superficie de 0.35 ha, que opera bajo un esquema de bombeo de extracción con rebombeo. En este caso, la configuración hidráulica requiere una bomba adicional para impulsar el agua desde el estanque de almacenamiento hasta el área de cultivo, lo que implica un incremento en la complejidad del sistema y en los costos asociados de inversión, operación y mantenimiento.

El sistema es completamente independiente de la red eléctrica, ya que se considera un pozo artesanal con suficiente agua y pronta recarga. Esto permite la operación de la bomba solar de extracción durante todas las horas de luz.

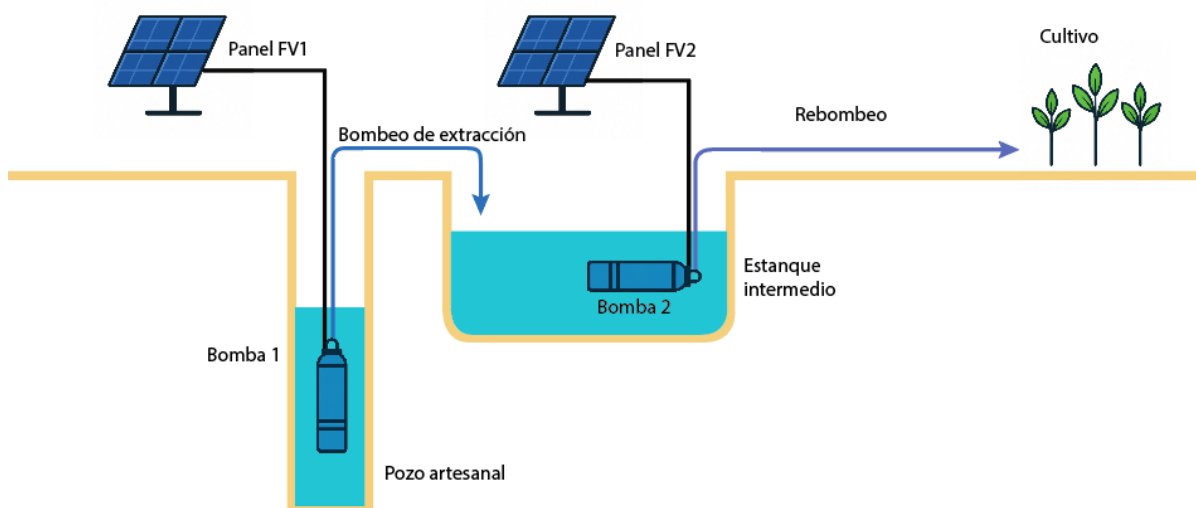


Figura 12. Configuración del sistema del análisis económico 1.

El análisis se desarrolla considerando el uso de tecnología de alta gama de la marca Lorentz, cuyas bombas se caracterizan por su instalación sencilla tipo “plug and play”. Esta característica resulta especialmente conveniente para pequeños productores que cultivan superficies del orden de 0.35

E4. Selección de Tecnologías

ha, ya que facilita el montaje del sistema, reduce la complejidad operativa y disminuye los requerimientos de asistencia técnica especializada. Asimismo, en caso de requerirse reparaciones fuera de los períodos de garantía, el productor puede enviar el equipo vía courier para su atención a través del distribuidor autorizado en Guatemala, lo que contribuye a una gestión de mantenimiento más accesible y confiable.

SPIS Toolbox 2. Datos de entrada para una de las múltiples simulaciones desarrolladas para este sistema.

Supuestos de costo para:		Sistema de riego con energía solar	
Costos de capital inicial	Paneles solares	7,371	GTQ
	Estructura de montaje		GTQ
	Unidad de control	3,256	GTQ
	Bomba	27,132	GTQ
	Cables/tubos		GTQ
	Almacenamiento de agua		GTQ
	Sistema de riego		GTQ
	Perforación		GTQ
	Instalación	18,088	GTQ
	Otros costos	1,130	GTQ
Total de costos		28,488	GTQ
Costos corrientes	Costos de mantenimiento por año:	600	GTQ
	Costos operativos por año:	200	GTQ
	Total de costos por año:	800	GTQ
Préstamo	Importe préstamo	28,488	GTQ
	Tasa de interés	10%	
	Período de inversión	2	Años
	Nombre de entidad bancaria		

Vida útil de componentes	
	20 Años
	Años
	10 Años
	10 Años
	Años
	Años
	Años

¡Muy dependiente de la calidad!

Subsidio	
Importe de subsidio en los costos de capital	28,488 GTQ
Subsidio	50%
Inversión	56,976.15

SPIS Toolbox 3. Datos de salida para una de las múltiples simulaciones desarrolladas para este sistema.

Análisis para Sistema de riego con energía solar	
Tasa Interna de Retorno (TIR 25 años)	14%
Valor actual neto (VAN) durante 25 años	100507.853 GTQ
Flujo de efectivo acumulado tras el año 25	509214.181 GTQ
Costos del ciclo de vida del sistema (25 años)	221845.219 GTQ
Años para amortización:	8
Banco de crédito:	
Amortización del préstamo anual:	16414.558 GTQ

La siguiente Figura presenta la evolución del flujo de efectivo acumulado del sistema de riego con energía solar durante los primeros 10 años de operación, expresado en quetzales (GTQ). La trayectoria de la curva refleja las distintas etapas económicas del proyecto y está directamente influenciada por los supuestos de inversión, financiamiento y nivel de subsidio aplicados en esta simulación base.

En los primeros años (años 0 a 3), el flujo de efectivo acumulado es negativo, alcanzando su valor mínimo alrededor del año 2. Esta fase corresponde principalmente a la inversión de capital inicial, cuyo costo total asciende a 28,488 GTQ. En el escenario representado, se considera un subsidio del 50% sobre la inversión inicial, lo que reduce de forma significativa el capital que debe ser financiado por el productor y, en consecuencia, el monto del préstamo y el peso del servicio de deuda en los primeros años. El flujo acumulado permanece negativo durante la fase inicial debido a los pagos de amortización y al desfase temporal entre la inversión y la generación plena de beneficios agrícolas.

A partir del año 4, el flujo de efectivo acumulado comienza a recuperarse de manera sostenida. Este cambio se explica por la combinación de costos operativos bajos y estables (800 GTQ por año), la ausencia de gastos en combustible, y la generación de ingresos agrícolas estimados en

50,000 GTQ anuales, con un crecimiento del margen de beneficio del 8% anual. El subsidio juega un rol clave en esta etapa al acelerar la recuperación de la inversión, al reducir la carga financiera inicial y mejorar la capacidad del sistema para generar excedentes netos.

El punto de equilibrio se alcanza aproximadamente entre los años 7 y 8, lo cual es consistente con el periodo de amortización estimado de 8 años. Este resultado corresponde al nivel de subsidio considerado en este escenario base y sirve como referencia para evaluar cómo variaciones en el porcentaje de subsidio afectan el tiempo de recuperación, la magnitud de los flujos negativos iniciales y la resiliencia financiera del sistema.

Entre los años 8 y 9, se observa un crecimiento más pronunciado del flujo de efectivo acumulado, alcanzando valores positivos cercanos a 25,000 GTQ, reflejando una etapa en la que el sistema opera con una menor presión financiera y mayores beneficios netos. Hacia el año 10, se aprecia una ligera reducción del flujo acumulado, asociada a la posible reposición de componentes con vida útil media (bomba y controlador), lo cual introduce un gasto puntual sin comprometer la viabilidad global del proyecto.

Es importante destacar que el subsidio constituye una variable estratégica dentro del análisis económico y no un parámetro fijo. En las siguientes simulaciones, el nivel de subsidio será ajustado para analizar distintos escenarios de adopción, evaluando su impacto sobre indicadores clave como el flujo de efectivo acumulado, el periodo de recuperación, el VPN y la TIR. Este enfoque permite identificar niveles de subsidio óptimos que faciliten la adopción inicial de la tecnología, al tiempo que promuevan la autosostenibilidad financiera de los sistemas de riego solar en el largo plazo.

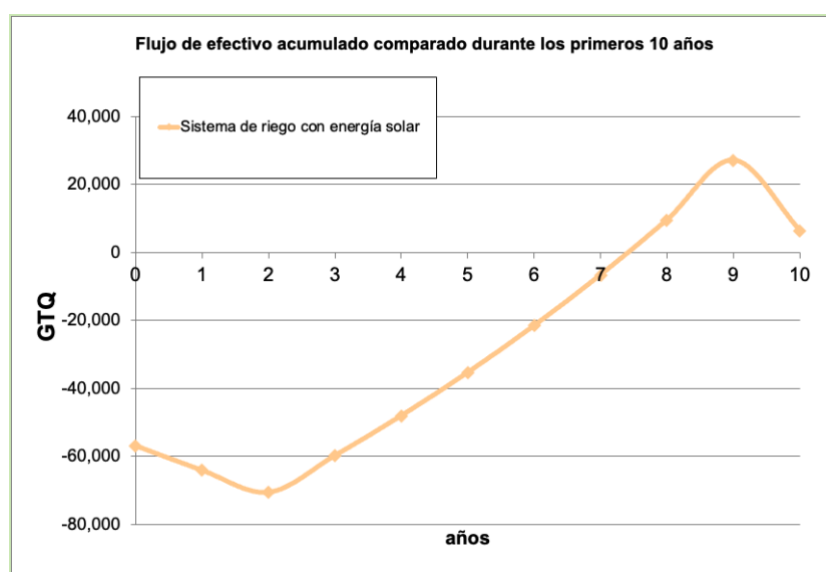


Figura 13. Flujo de efectivo y tiempo de repago del sistema.

4.1.1. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 21 simulaciones

Simulación	Inflación	Tasa	Profit	Increm.	Ingreso	PI:profit	Inversión	Subsidio		Prestamo	Interes	Periodo	Tarifa	IRR	NPV	Paybak	Pago prest	Notas
#	%	desc.	incremento de precios de productos agrícolas	electricidad	Q/año	invers.	Qz	Qz	%	Qz	%	años	Qz/kwh	%	Qz	años	Qz/anual	
1	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	56,976	56,976	100%	0	10%	2	2.0	16.0%	136337.512 GTQ	7	.0 GTQ	Caso base
2	2.7%	12%	8%	0%	40,000	15%	56,976	56,976	100%	0	10%	2	2.0	9.6%	-70660.290 GTQ	11	.0 GTQ	No Factible
3	2.7%	12%	8%	0%	40,000	10%	56,976	56,976	100%	0	10%	2	2.0	-1.7%	-277658.092 GTQ	16	.0 GTQ	Con tasas de reinversión menores al 10%, el proyecto deja de presentar viabilidad económica. Por lo tanto, se asumirá una reinversión mínimo del 20%.
4	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	56,976	51,279	90%	5,698	10%	2	2.0	14.4%	87772.020 GTQ	7	3282.912 GTQ	los pagos mensuales serían de 274 GTQ (8.22%)
5	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	56,976	45,581	80%	11,395	10%	2	2.0	13.0%	39206.527 GTQ	9	6565.823 GTQ	los pagos mensuales serían de 547 GTQ (16.41%)
6	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	56,976	42,732	75%	14,244	10%	2	2.0	12.4%	14923.781 GTQ	9	8207.279 GTQ	los pagos mensuales serían de 684 GTQ (20.52%)
7	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	56,976	38,883	70%	17,093	10%	2	2.0	11.8%	-9358.965 GTQ	9	9848.735 GTQ	No Factible
8	2.7%	12%	8%	0%	30,000	20%	56,976	42,732	75%	14,244	10%	2	2.0	6.0%	-192074.021 GTQ	13	8207.279 GTQ	No Factible
9	2.7%	12%	8%	0%	30,000	20%	56,976	51,279	90%	5,698	10%	2	2.0	8.1%	-119225.782 GTQ	12	3282.912 GTQ	No Factible
10	2.7%	12%	8%	0%	30,000	20%	56,976	56,976	100%	0	10%	2	2.0	9.6%	-70660.290 GTQ	11	.0 GTQ	No Factible
11	2.7%	12%	8%	0%	30,000	5%	56,976	56,976	100%	0	10%	2	2.0	no factible	-536405.345 GTQ	no payback	.0 GTQ	No hay forma de que con ingresos de 30000 el proyecto se pueda hacer viable, ni bajando la tasa de reinversión al 5%
12	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	42,732	75%	14,244	10%	2	2.0	17.2%	221921.583 GTQ	7	8207.279 GTQ	los pagos mensuales serían de 684 GTQ (16.42%)
13	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	10%	2	2.0	14.2%	100507.853 GTQ	8	16414.558 GTQ	los pagos mensuales serían de 1368 GTQ (32.83%)
14	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	22,790	40%	34,186	10%	2	2.0	13.1%	51942.361 GTQ	9	19697.469 GTQ	los pagos mensuales serían de 1641 GTQ (39.38%)
15	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	17,093	30%	39,883	10%	2	2.0	12.1%	3376.869 GTQ	10	22980.381 GTQ	los pagos mensuales serían de 1778 GTQ (45.96%)
16	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	14,244	25%	42,732	10%	2	2.0	11.6%	-20905.878 GTQ	10	24621.836 GTQ	No Factible
17	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	17%	2	2.0	13.6%	77480.999 GTQ	8	17971.118 GTQ	los pagos mensuales serían de 1498 GTQ (35.95%)
18	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	20%	2	2.0	13.4%	67486.237 GTQ	8	18646.740 GTQ	los pagos mensuales serían de 1554 GTQ (37.30%)
19	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	25%	2	2.0	13.0%	50671.363 GTQ	9	19783.385 GTQ	los pagos mensuales serían de 1649 GTQ (39.58%)
20	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	10%	1	2.0	14.0%	97555.785 GTQ	8	31336.883 GTQ	los pagos mensuales serían de 2611 GTQ (62.66%)
21	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	17%	1	2.0	13.7%	81915.270 GTQ	8	33331.048 GTQ	los pagos mensuales serían de 2778 GTQ (66.67%)
22	3%	12%	8%	0%	50,000	20%	56,976	28,488	50%	28,488	20%	1	2.0	13.5%	75212.192 GTQ	8	34185.690 GTQ	los pagos mensuales serían de 2849 GTQ (68.38%)
Notas		Cambios en la simulacion																

4.1.2. Resultados principales del análisis económico 1

4.1.2.1. Efecto del ingreso anual del productor

Los resultados muestran que el ingreso anual es el factor determinante de la viabilidad económica del SPIS:

- 30,000 GTQ/año: Ningún escenario resulta viable. Incluso con subsidios altos y tasas de interés reducidas, los flujos de caja no permiten cubrir las reinversiones ni sostener el pago del préstamo.
- 40,000 GTQ/año: Se identifican escenarios marginalmente viables, pero condicionados a una reinversión mínima del 20% y al acceso a subsidios significativos.
- 50,000 GTQ/año: La mayoría de las simulaciones presentan TIR positivas y períodos de recuperación entre 7 y 11 años, indicando que el productor puede sostener las reinversiones y cumplir con la estructura de pago.

Esto indica que el umbral mínimo de ingreso sostenible para la adopción del SPIS se encuentra entre 40,000 y 50,000 GTQ/año, dependiendo del financiamiento y el nivel de subsidio.

4.1.2.2. Necesidad de reinversión para asegurar sostenibilidad

Un hallazgo clave del análisis es que la reinversión anual mínima necesaria es del 20%. Cuando la reinversión se reduce al 10% o menos, la viabilidad económica se pierde incluso bajo escenarios favorables, debido a que el productor no puede reponer componentes críticos del sistema (bomba, controlador, cableado, soportes) durante la vida útil del proyecto.

4.1.2.3. Rol del subsidio y de las condiciones de financiamiento

El subsidio mejora la viabilidad económica al reducir los costos iniciales; sin embargo:

- El subsidio por sí solo no garantiza la viabilidad económica si el productor no dispone de ingresos suficientes.
- Las tasas de interés entre 10% y 20% modifican el valor de las cuotas mensuales, pero no alteran la conclusión general respecto al nivel de ingreso mínimo necesario.
- Esto subraya la importancia de diseñar mecanismos financieros adaptados a la capacidad real de pago de los productores, más allá de la simple reducción de CAPEX.

Adicionalmente, es relevante considerar las condiciones actuales de financiamiento en la región. Durante la primera visita técnica, realizada como parte de la investigación sobre prácticas de riego y entrevistas con instituciones financieras locales (CONSAJER y Banrural), se identificó que las tasas de interés para créditos agrícolas tradicionales se sitúan por encima del 17% hasta 25%. Esta información fue posteriormente corroborada durante la segunda visita de campo, enfocada en la selección de los sitios para la implementación de los proyectos piloto. Estas tasas elevadas constituyen una barrera importante para la adopción de tecnologías como los sistemas de bombeo solar.

Sin embargo, durante el período de la pandemia por COVID-19 se implementó un programa agrícola especial que permitió otorgar préstamos con tasas cercanas al 10%, demostrando que existen precedentes institucionales para esquemas financieros más accesibles.

Dado el carácter social y productivo de este proyecto, se considera fundamental promover negociaciones con entidades financieras para establecer tasas preferenciales similares, facilitando así la adopción de tecnologías solares y fortaleciendo la sostenibilidad económica de la agricultura de pequeña escala.

4.1.2.4. Análisis del período del préstamo y capacidad de pago del productor

El período del préstamo constituye uno de los elementos más influyentes en la capacidad de pago del productor y, por tanto, en la viabilidad económica del sistema de bombeo solar. En las simulaciones realizadas se evaluaron dos escenarios principales: préstamos con amortización a 1 año y a 2 años, observándose diferencias sustantivas en la carga financiera aplicada al productor.

En los escenarios con ingresos anuales de 50,000 GTQ, se identificó que los préstamos con período de 1 año generan cuotas mensuales entre 2,611 y 2,849 GTQ, lo que representa entre 62% y 68% del ingreso mensual disponible. Este nivel de esfuerzo financiero es excesivo e incompatible con la realidad económica de los pequeños agricultores, ya que limita su capacidad para sostener otros gastos productivos, cubrir reinversiones mínimas y mantener la operación del sistema.

Por el contrario, los préstamos con período de 2 años presentan cuotas considerablemente más bajas, ubicándose en el rango de 1,498 a 1,555 GTQ en las simulaciones correspondientes. Estas cuotas reducidas se alinean en mayor medida con la capacidad de pago del productor y permiten que el proyecto sea financieramente sostenible, siempre y cuando se mantenga una reinversión mínima del 20%. Para efectos analíticos, los resultados se expresan en términos mensuales; sin embargo, es importante señalar que las instituciones financieras suelen ofrecer mecanismos de pago adaptados a los ciclos agrícolas, lo cual facilita adecuar los desembolsos a la estacionalidad de la actividad productiva.

Es importante destacar que, en la práctica, las instituciones financieras que operan en las áreas rurales visitadas suelen ofrecer a los pequeños productores créditos con períodos de amortización de únicamente 1 año, y solo de manera excepcional se extienden plazos de 2 años. Esta situación limita significativamente la adopción de tecnologías como los sistemas de bombeo solar, ya que los pagos asociados a un préstamo anual exceden la capacidad de pago observable incluso en productores con ingresos relativamente altos. Por ello, para la adecuada implementación de los proyectos piloto y la sostenibilidad del modelo propuesto, será indispensable promover esquemas de financiamiento con plazos mínimos de 2 años, en coherencia con las necesidades operativas del proyecto y la estructura real de ingresos agrícolas de los pequeños productores. Este ajuste permitirá que los agricultores se beneficien plenamente de la tecnología, reduzcan riesgos financieros y adopten el sistema de bombeo solar de manera eficaz y sostenible.

En síntesis, los resultados muestran que la adopción de sistemas de bombeo solar es viable únicamente bajo condiciones específicas relacionadas con el nivel de ingreso del productor, la estructura de reinversión y el acceso a financiamiento adecuado. Estos elementos deberán considerarse en la implementación de los proyectos piloto y en el diseño de mecanismos de apoyo que permitan una adopción sostenible en las comunidades seleccionadas.

4.2. Análisis económico 2: SPIS para el riego de 0.7 ha: Bombeo de extracción sin rebombeo

Este análisis económico se enfoca en un sistema de riego solar diseñado para abastecer una superficie de 0.7 ha mediante un esquema de bombeo de extracción, sin necesidad de rebombeo, ya que el estanque de almacenamiento se localiza aproximadamente 7 m por encima del área de cultivo, permitiendo la distribución por gravedad.

En la operación actual, el sistema funciona con energía de la red eléctrica y cuenta con 2 pozos de 30 m de profundidad, cada uno equipado con una bomba de 2 HP, las cuales operan dos veces al día durante una hora en cada ocasión para cubrir la demanda de agua; sin embargo, la recarga de los pozos es muy lenta y ambos se agotan después de una hora de extracción continua, bombeando el agua al estanque elevado.

La propuesta consiste en implementar sistemas híbridos solar-red mediante inversores conectados a la red con cero inyección, considerando dos escenarios:

- Caso 1, se energizan las dos bombas con dos sistemas fotovoltaicos híbridos independientes, cada uno acoplado a la red y manteniendo el esquema de operación actual;

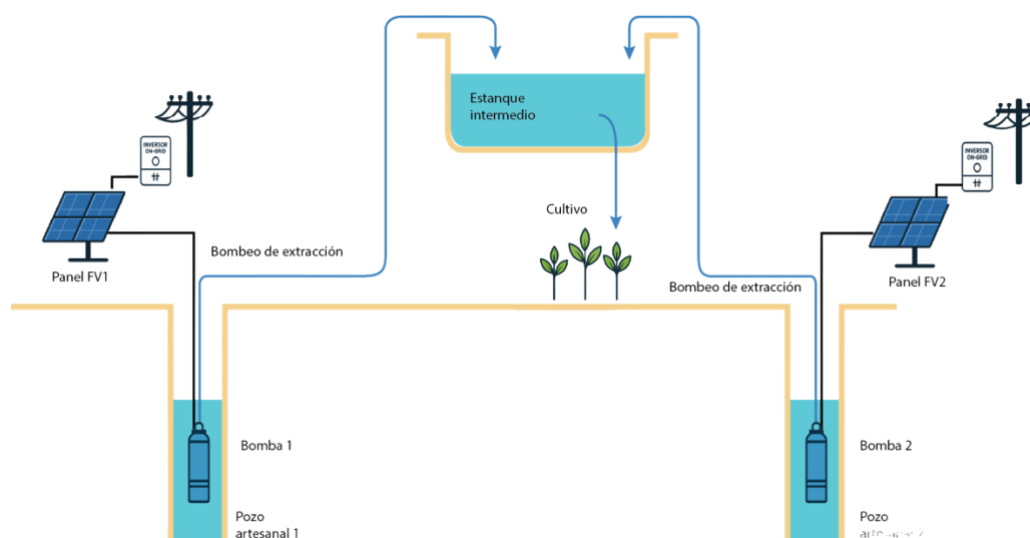


Figura 14. Configuración del sistema del análisis económico 2, caso 1.

- Caso 2, se energiza únicamente una de las bombas con un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red, de modo que esta opere dos veces al día con energía solar durante las horas de mayor radiación y, adicionalmente, pueda funcionar por la noche utilizando energía de la red, asegurando la continuidad del suministro de agua al estanque de almacenamiento y al sistema de riego.

SPIS Toolbox 5. Datos de salida para una de las múltiples simulaciones desarrolladas en el análisis económico 2, caso 1.

Análisis para Sistema de riego con energía solar	
Tasa Interna de Retorno (TIR 25 años)	19%
Valor actual neto (VAN) durante 25 años	313868.290 GTQ
Flujo de efectivo acumulado tras el año 25	563790.302 GTQ
Costos del ciclo de vida del sistema (25 años)	167269.097 GTQ
Años para amortización:	7
Banco de crédito:	
Amortización del préstamo anual:	6435.181 GTQ

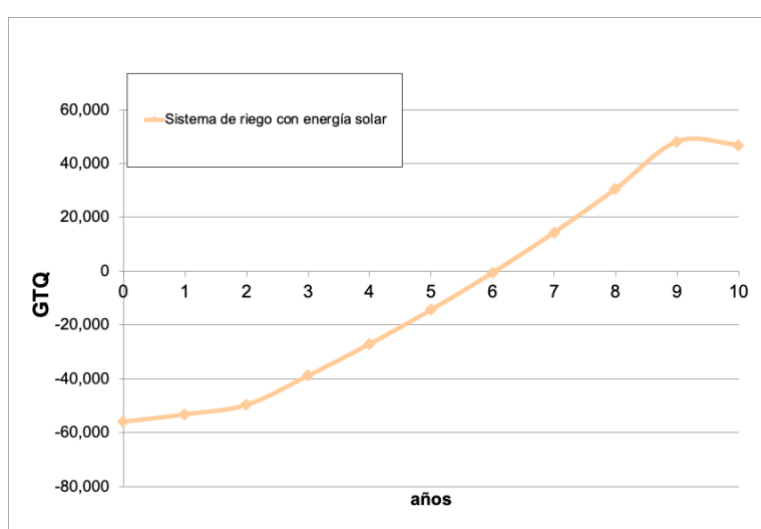


Figura 16. Flujo de efectivo y tiempo de repago del sistema.

La siguiente Tabla presenta una serie de escenarios económicos comparables, en los cuales se modifican de manera controlada el nivel de subsidio, monto de inversión asumido por el productor, una vez aplicado el subsidio, condiciones de financiamiento, incluyendo monto del préstamo, tasa de interés y plazo y flujos de ingresos agrícolas, considerando beneficios constantes o crecientes en función de los supuestos productivos. Además de los indicadores financieros resultantes, tales como flujo de caja anual, flujo de efectivo acumulado, periodo de recuperación, TIR y VPN.

Se puede observar cómo el sistema transita desde escenarios con mayor carga financiera inicial, caracterizados por flujos negativos prolongados, hacia escenarios con mejor desempeño económico, en los cuales la recuperación de la inversión es más rápida y los riesgos financieros para el productor se reducen significativamente.

Los resultados muestran que, en ausencia de subsidio o con niveles bajos de apoyo, el sistema presenta flujos de caja negativos durante los primeros años, asociados principalmente al peso de la inversión inicial y al servicio de la deuda. En estos escenarios, el periodo de recuperación se extiende y la capacidad del productor para absorber riesgos financieros es limitada, especialmente considerando las condiciones de pequeños productores agrícolas.

A medida que se incrementa el nivel de subsidio, se observa una reducción progresiva del capital financiado, lo que se traduce en:

- Menores pagos anuales de amortización,
- Flujos de caja menos negativos en los primeros años,
- Un adelanto del punto de equilibrio, y
- Mejores indicadores financieros globales (mayor VPN y TIR).

En los escenarios intermedios y altos de subsidio, el sistema alcanza flujos de efectivo acumulados positivos dentro de horizontes temporalmente razonables, coherentes con la vida útil de los principales componentes del sistema fotovoltaico. Esto confirma que el subsidio actúa como un mecanismo habilitador de la adopción inicial, más que como un elemento permanente de sostenimiento económico.

4.2.1. Caso 1: Rol del subsidio como variable de política y diseño

Es importante destacar que el subsidio no se plantea como un valor fijo, sino como una variable estratégica de análisis. Las múltiples simulaciones presentadas permiten identificar rangos de subsidio que:

- Facilitan la adopción del sistema por parte de pequeños productores,
- Reducen el riesgo financiero en las etapas tempranas,
- Y promueven una transición progresiva hacia esquemas más autosostenibles.

Este enfoque es especialmente relevante desde una perspectiva de política pública y diseño de programas, ya que permite evaluar qué niveles de subsidio generan el mayor impacto económico y social por unidad de inversión pública, manteniendo la viabilidad técnica y financiera del sistema.

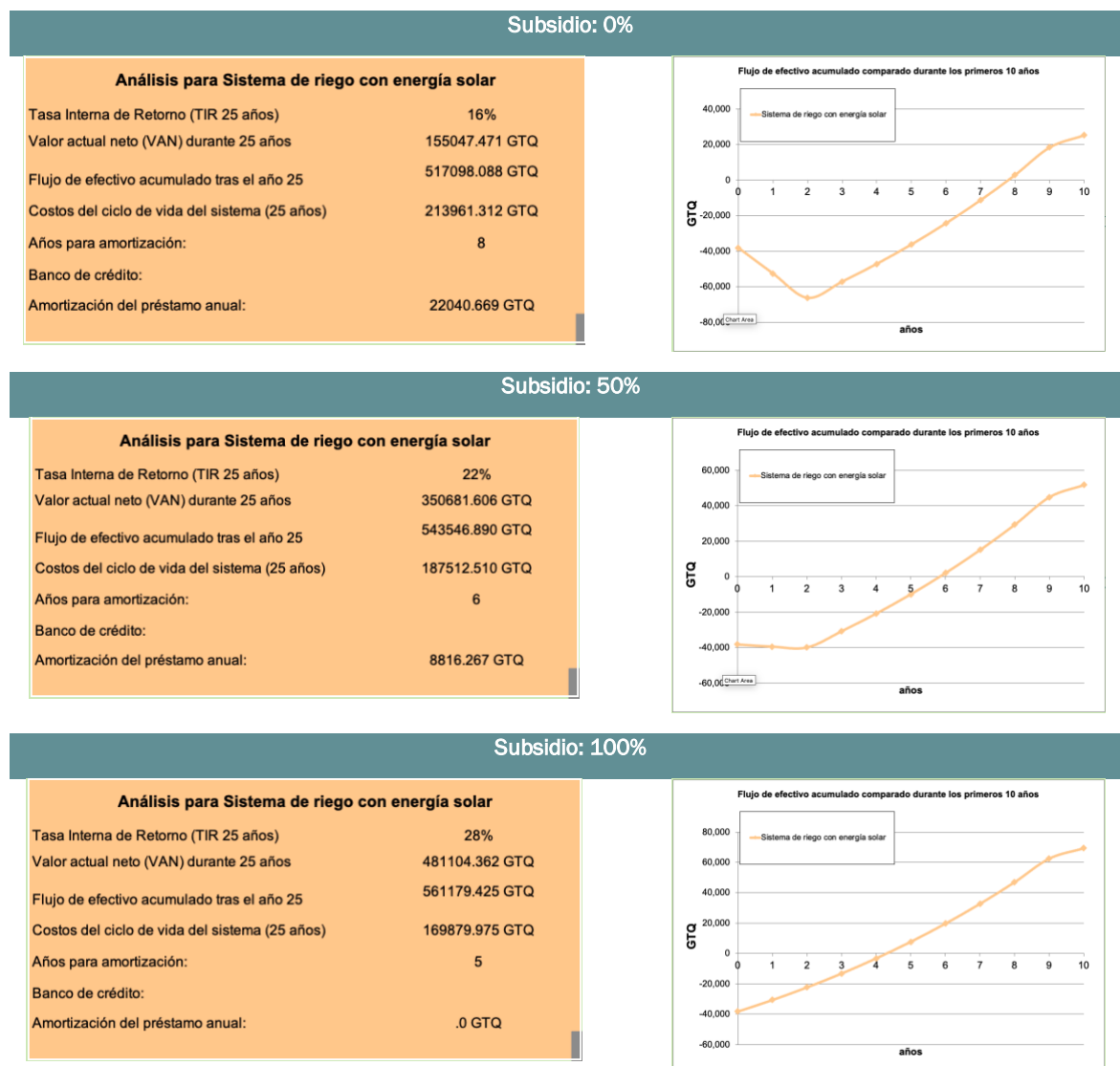
En conjunto, los múltiples análisis económicos realizados para el Caso 1 demuestran que la solarización del sistema de riego para 0.7 ha mediante bombeo de extracción sin rebombeo es económicamente viable bajo determinados esquemas de subsidio y financiamiento, y que el desempeño económico mejora de forma significativa a medida que se reduce la carga financiera inicial del productor. Los resultados obtenidos sirven como base para comparar este caso con otras configuraciones tecnológicas y para definir estrategias de escalamiento y replicabilidad en contextos similares.

E4. Selección de Tecnologías

4.2.2. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 40 simulaciones para el caso 1.

Simulación	Inflación	Tasa	Profit	Increment.	Ingreso	Pl:profit	Inversión	Subsidio		Prestamo	Interes	Periodo	Tarifa	IRR	NPV	Paybak	Pago prest	Pagos mensuales
#	%	desc.	incremento de precios de productos agrícolas	electricidad	Q/año	invers.	Qz	Qz	%	Qz	%	años	Qz/kwh	%	Qz	años	Qz/añual	
1	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	55,842	0	0%	55,842	10%	2	1.7	6.5%	-273,923	12	32,176	Caso base
2	2.7%	12%	8%	0%	40,000	27%	55,842	0	0%	55,842	10%	2	1.7	12.3%	15,874	9	32,176	2681 GTQ (80.43%)
3	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	55,842	55,842	100%	0	10%	2	1.7	17.6%	202,069	7	0	0 GTQ (0.00%)
4	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	10%	2	1.7	14.7%	106,870	8	6,435	536 GTQ (16.08%)
5	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	10%	2	1.7	12.3%	11,672	9	12,870	1073 GTQ (32.19%)
6	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	55,842	27,921	50%	27,921	10%	2	1.7	11.2%	-35,927	10	16,088	1341 GTQ (40.23%)
7	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	55,842	100%	0	10%	2	1.7	22.4%	409,067	6	0	0 GTQ (0.00%)
8	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	10%	2	1.7	19.3%	313,868	7	6,435	536 GTQ (12.86%)
9	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	10%	2	1.7	16.7%	218,670	7	12,870	1073 GTQ (25.75%)
10	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	10%	2	1.7	14.5%	123,472	8	19,306	1609 GTQ (38.62%)
11	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	10%	2	1.7	12.5%	28,273	9	25,741	2145 GTQ (51.48%)
12	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	0	0%	55,842	10%	2	1.7	10.8%	-66,925	11	32,176	2681 GTQ (64.34%)
13	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	55,842	100%	0	10%	2	1.7	26.7%	616,064	5	0	0 GTQ (0.00%)
14	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	10%	2	1.7	23.3%	520,866	6	6,435	536 GTQ (10.72%)
15	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	10%	2	1.7	20.6%	425,668	6	12,870	1073 GTQ (21.46%)
16	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	10%	2	1.7	18.2%	330,469	7	19,306	1609 GTQ (32.18%)
17	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	10%	2	1.7	16.1%	235,271	8	25,741	2145 GTQ (42.90%)
18	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	0	0%	55,842	10%	2	1.7	14.3%	140,073	8	32,176	2681 GTQ (53.62%)
19	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	55,842	100%	0	17%	2	1.7	26.7%	616,064	5	0	0 GTQ (0.00%)
20	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	17%	2	1.7	23.1%	511,839	6	7,045	587 GTQ (11.74%)
21	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	17%	2	1.7	20.1%	407,613	7	14,091	1174 GTQ (23.48%)
22	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	17%	2	1.7	17.6%	303,387	7	21,136	1761 GTQ (36.22%)
23	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	17%	2	1.7	15.4%	199,161	8	28,182	2348 GTQ (46.96%)
24	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	0	0%	55,842	17%	2	1.7	13.5%	94,935	9	35,227	2936 GTQ (58.72%)
25	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	55,842	100%	0	20%	2	1.7	26.7%	616,064	5	0	0 GTQ (0.00%)
26	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	20%	2	1.7	22.9%	507,920	6	7,310	609 GTQ (12.18%)
27	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	20%	2	1.7	19.9%	399,776	7	14,621	1218 GTQ (24.36%)
28	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	20%	2	1.7	17.3%	291,632	7	21,931	1828 GTQ (36.58%)
29	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	20%	2	1.7	15.1%	183,488	8	29,241	2437 GTQ (48.74%)
30	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	0	0%	55,842	20%	2	1.7	13.2%	75,344	9	36,551	3046 GTQ (60.92%)
31	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	10%	1	1.7	23.2%	519,709	6	12,285	1024 GTQ (20.48%)
32	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	10%	1	1.7	20.3%	423,353	6	24,571	2048 GTQ (40.96%)
33	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	10%	1	1.7	18.0%	326,997	7	36,856	3071 GTQ (61.42%)
34	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	10%	1	1.7	15.9%	230,642	8	49,141	4095 GTQ (81.90%)
35	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	55,842	0	0%	55,842	10%	1	1.7	14.1%	134,286	8	61,427	5119 GTQ (102.38%)
36	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	10%	1	1.7	19.2%	312,711	6	12,285	1024 GTQ (24.58%)
37	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	10%	1	1.7	16.6%	216,365	7	24,571	2048 GTQ (49.15%)
38	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	10%	1	1.7	14.4%	120,000	8	36,856	3071 GTQ (73.70%)
39	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	10%	1	1.7	12.4%	23,644	9	49,141	4095 GTQ (98.28%)
40	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	0	0%	55,842	10%	1	1.7	10.7%	-72,712	11	61,427	5119 GTQ (122.96%)
41	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	44,674	80%	11,168	20%	1	1.7	18.9%	303,951	7	13,402	1117 GTQ (26.81%)
42	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	33,505	60%	22,337	20%	1	1.7	16.1%	198,836	7	26,804	2234 GTQ (53.62%)
43	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	20%	1	1.7	13.8%	93,721	8	40,207	3351 GTQ (80.42%)
44	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	11,168	20%	44,674	20%	1	1.7	11.8%	-11,394	9	53,609	4467 GTQ (107.21%)
45	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	22,337	40%	33,505	20%	1	1.7	13.8%	93,721	8	40,207	3351 GTQ (80.42%)
46	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	55,842	0	0%	55,842	20%	1	1.7	10%	-116,510	11	67,011	5584 GTQ (134.02%)
Notas		Cambios en la simulacion																

SPIS Toolbox 7. Datos de salida para tres simulaciones desarrolladas en el análisis económico 2, caso 2.



Los múltiples análisis económicos realizados para el Caso 2, resumidos en la siguiente Tabla, permiten evaluar el comportamiento financiero del sistema híbrido solar-red bajo diferentes combinaciones de inversión, subsidio y condiciones operativas. Este enfoque por escenarios permite identificar tendencias estructurales, así como los factores que más influyen en la sostenibilidad económica del sistema.

4.2.3.1. Caso 2: Tendencias generales observadas

Una primera tendencia clara es que el desempeño económico del sistema mejora progresivamente a medida que se reduce la carga de inversión asumida por el productor, ya sea mediante mayores niveles de subsidio o a través de esquemas de financiamiento más favorables. En los escenarios con menor apoyo a la inversión, los flujos de caja iniciales son significativamente negativos y el periodo de recuperación se alarga, lo que incrementa el riesgo financiero para pequeños productores. Esta tendencia confirma que, en el contexto de sistemas híbridos para pequeños productores, el subsidio cumple un rol habilitador clave durante las fases iniciales de adopción.

4.2.3.2. Comportamiento de los flujos de caja y periodo de recuperación

Los flujos de caja anuales muestran un patrón relativamente estable a lo largo del tiempo, con diferencias principalmente en la magnitud del déficit inicial y en el momento en que el flujo acumulado se vuelve positivo. En la mayoría de los escenarios económicamente viables, el punto de equilibrio se alcanza entre los años 6 y 8, lo cual es coherente con la vida útil de los componentes principales del sistema.

Una característica distintiva del Caso 2 es que, aun cuando el sistema incurre en costos operativos adicionales asociados al consumo nocturno de electricidad, estos costos no comprometen de forma significativa la viabilidad económica global, siempre que los ingresos agrícolas se mantengan dentro de los rangos esperados. Esto indica que el esquema híbrido permite trasladar parte del riesgo desde la inversión inicial hacia costos operativos manejables, lo cual puede resultar preferible en contextos de alta incertidumbre hidrogeológica.

4.2.3.3. Sensibilidad frente al uso de la red eléctrica

Los escenarios analizados muestran que el uso de la red eléctrica como respaldo tiene un impacto económico moderado pero sistemático. A mayor dependencia nocturna de la red, mayores son los costos operativos y menor el excedente anual disponible; sin embargo, esta reducción es gradual y no abrupta. Esto sugiere que el sistema es robusto frente a variaciones razonables en el consumo de red, siempre que dicho uso sea complementario y no sustituya completamente la operación solar.

Desde una perspectiva de gestión, esta tendencia resalta la importancia de una programación eficiente del bombeo, priorizando el uso de energía solar en horas de alta radiación y utilizando la red únicamente para cubrir déficits puntuales de agua, asociados a la recarga del pozo o a requerimientos críticos del cultivo.



4.2.4. SPIS Invest Toolbox: Resultados de 40 simulaciones para el caso 2.

Simulación	Inflación	Tasa	Profit	Increm.	Ingreso	Pl:profit	Inversión	Subsidio		Prestamo	Interes	Periodo	Tarifa	IRR	NPV	Paybak	Pago prest	Pagos mensuales
								Qz	%									
1	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	2	1.7	10.7%	-51,950	11	22,041	Caso base
2	2.7%	12%	8%	0%	40,000	22%	38,252	0	0%	38,252	10%	2	1.7	12.7%	30,849	9	22,041	1837 GTQ (55.11%)
3	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	38,252	100%	0	10%	2	1.7	21.7%	274,107	6	0	0 GTQ (0.00%)
4	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	10%	2	1.7	18.8%	208,895	7	4,408	367 GTQ (11.01%)
5	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	10%	2	1.7	16.3%	143,684	8	8,816	735 GTQ (22.05%)
6	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	10%	2	1.7	14.2%	78,472	9	13,224	1102 GTQ (33.06%)
7	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	10%	2	1.7	12.4%	13,261	9	17,633	1469 GTQ (44.07%)
8	2.7%	12%	8%	0%	40,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	2	1.7	10.7%	-51,950	11	22,041	1837 GTQ (55.11%)
9	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	38,252	100%	0	10%	2	1.7	27.7%	481,104	5	0	0 GTQ (0.00%)
10	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	10%	2	1.7	24.4%	415,893	6	4,408	367 GTQ (8.81%)
11	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	10%	2	1.7	21.7%	350,682	6	8,816	735 GTQ (17.84%)
12	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	10%	2	1.7	19.3%	285,470	7	13,224	1102 GTQ (26.45%)
13	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	10%	2	1.7	17.3%	220,259	8	17,633	1469 GTQ (35.26%)
14	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	2	1.7	15.5%	155,047	8	22,041	1837 GTQ (44.09%)
15	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	38,252	100%	0	10%	2	1.7	33.3%	688,102	4	0	0 GTQ (0.00%)
16	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	10%	2	1.7	29.6%	622,891	5	4,408	367 GTQ (7.34%)
17	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	10%	2	1.7	26.5%	557,679	5	8,816	735 GTQ (14.70%)
18	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	10%	2	1.7	23.9%	492,468	6	13,224	1102 GTQ (22.04%)
19	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	10%	2	1.7	21.6%	427,257	7	17,633	1469 GTQ (29.38%)
20	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	2	1.7	19.7%	362,045	7	22,041	1837 GTQ (36.74%)
21	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	20%	2	1.7	29.1%	614,023	5	5,008	417 GTQ (8.34%)
22	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	20%	2	1.7	25.7%	539,943	6	10,015	835 GTQ (16.70%)
23	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	20%	2	1.7	22.9%	465,864	6	15,023	1252 GTQ (25.04%)
24	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	20%	2	1.7	20.5%	391,785	7	20,030	1689 GTQ (33.38%)
25	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	0	0%	38,252	20%	2	1.7	18.5%	317,705	7	25,038	2086 GTQ (41.72%)
26	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	10%	1	1.7	29.3%	622,098	5	8,416	701 GTQ (14.02%)
27	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	10%	1	1.7	26.1%	556,094	5	16,831	1403 GTQ (28.06%)
28	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	10%	1	1.7	23.5%	490,090	6	25,247	2104 GTQ (42.08%)
29	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	10%	1	1.7	21.3%	424,086	6	33,662	2805 GTQ (56.10%)
30	2.7%	12%	8%	0%	60,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	1	1.7	19.3%	358,081	7	42,078	3506 GTQ (70.12%)
31	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	10%	1	1.7	24.3%	415,100	6	8,416	701 GTQ (16.82%)
32	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	10%	1	1.7	21.4%	349,096	6	16,831	1403 GTQ (33.67%)
33	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	10%	1	1.7	19.1%	283,092	7	25,247	2104 GTQ (50.50%)
34	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	10%	1	1.7	17.1%	217,088	8	33,662	2805 GTQ (67.32%)
35	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	0	0%	38,252	10%	1	1.7	15.3%	151,084	8	42,078	3506 GTQ (84.14%)
36	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	30,602	80%	7,650	20%	1	1.7	24.0%	409,100	6	9,181	755 GTQ (18.36%)
37	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	22,951	60%	15,301	20%	1	1.7	21.0%	337,095	6	18,361	1530 GTQ (36.72%)
38	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	15,301	40%	22,951	20%	1	1.7	18.5%	265,091	7	27,542	2295 GTQ (55.08%)
39	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	7,650	20%	30,602	20%	1	1.7	16.4%	193,086	8	36,722	3080 GTQ (73.44%)
40	2.7%	12%	8%	0%	50,000	20%	38,252	0	0%	38,252	20%	1	1.7	14.6%	121,082	8	45,903	3825 GTQ (91.80%)
Notas	Cambios en la simulacion																	

4.3. Consideraciones sobre el costo del bombeo nocturno

Si bien la configuración híbrida solar - red ofrece ventajas técnicas como la continuidad del servicio en condiciones de baja irradiación y nocturna, es importante advertir que su viabilidad económica para pequeños agricultores puede verse limitada. El bombeo nocturno depende exclusivamente de la red eléctrica, generando un consumo adicional que se traduce en un aumento directo en la factura mensual.

Por ello, se hace necesario establecer una estrategia de operación del bombeo solar - red, que asegure la flexibilidad técnica del sistema sin comprometer la sostenibilidad financiera de los usuarios.

4.3.1. Estrategia de operación del bombeo solar-red

En el modelo híbrido se debe maximizar el uso de energía solar y minimizar la dependencia de la red eléctrica.

El uso de la red garantiza la captación de agua en el estanque en momentos críticos, como cuando la recarga del pozo ocurre de noche o durante periodos nublados. Los tiempos de recarga son un parámetro determinante y pueden variar ampliamente, desde 8 horas hasta 4 días.

En consecuencia, resulta esencial extraer agua del pozo tan pronto como se disponga del nivel necesario, de modo que el proceso de recarga pueda reiniciarse cuanto antes. Sin embargo, cada pozo presenta un comportamiento distinto según sus características hidrogeológicas, por lo que la toma de decisiones sobre los horarios de bombeo, uso de respaldo eléctrico, volúmenes diarios debe analizarse de forma individual en cada sistema.

En comunidades como Rabinal y San Miguel Chicaj, donde la disponibilidad de agua es uno de los principales factores que limita la producción agrícola, esta práctica y su ajuste caso por caso resultan fundamentales para mantener la resiliencia de los sistemas de riego y reducir las pérdidas en la cosecha.

Bombeo de extracción del pozo:

- Priorizar la operación con energía solar durante las horas de mayor irradiación.
- Permitir el uso de la red únicamente como respaldo, en horarios controlados y con un límite de horas y kWh mensuales definidos por el agricultor o el grupo de agricultores organizados.
- Analizar los costos de energía cuando se utiliza el bombeo nocturno.

Bombeo para el riego:

- Operar exclusivamente con energía solar.
- Reservar el uso de la red eléctrica solo para emergencias excepcionales.

Gestión comunitaria:

- Definir topes de uso de red y un esquema de contribución por volumen de agua, de manera que la factura eléctrica se mantenga dentro de un rango accesible.
- Registrar consumos (kWh y m³) para evaluar la eficiencia y ajustar reglas de operación según la experiencia real.

Con esta estrategia, el sistema híbrido mantiene la flexibilidad técnica para garantizar agua en condiciones adversas, pero evita que el costo de la electricidad se convierta en un obstáculo económico para las familias usuarias.

4.3.2. Cómputo de la energía facturable asociada al uso de la red

En el modelo operativo definido, la energía diurna proviene del arreglo fotovoltaico y no se refleja en la factura eléctrica. Por tanto, la única energía facturable es la asociada al uso de la red eléctrica en los periodos habilitados, normalmente nocturnos o en condiciones de contingencia.

Criterio de cálculo (noche/red):

La bomba opera con potencia aproximadamente constante en su punto de operación hidráulico (caudal y presión definidos).

La energía facturable se calcula directamente como:

$$\text{kWh facturables} = P_{\text{operación}} \times t_{\text{red}}$$

donde $P_{\text{operación}}$ se obtiene de la curva del equipo o del registro del controlador en el punto real de trabajo y t_{red} son las horas de operación con suministro de red.

Ejemplo ilustrativo de cálculo de kWh facturables:

Potencia de operación = 1.5 kW; ventana nocturna: 3 h/día → 4.5 kWh/noche.

En 30 noches: 90 h/mes → 135 kWh facturables/mes

Con tarifa GTQ 1.7/kWh: GTQ 230/mes.

Para diez (10) agricultores organizados el costo mensual sería GTQ 23.0 por agricultor.

4.3.3. Reparto comunitario del costo

Para un grupo de diez (10) agricultores organizados, el costo mensual asociado al uso de la red eléctrica se distribuye en aproximadamente GTQ 23.0 por agricultor. Este esquema permite a la gestión comunitaria establecer y monitorear de forma clara los límites mensuales de energía (kWh) y horas de operación que inciden directamente en el recibo eléctrico, manteniendo la estrategia de operación solar-primero sin generar costos adicionales innecesarios para los usuarios.

4.3.4. Implicaciones económicas del uso de la red

Aunque los valores absolutos parecen bajos, la suma mensual puede resultar significativa para familias de ingresos limitados. Además, muchos hogares rurales apenas califican para la tarifa social subsidiada. En este contexto, la dependencia del bombeo nocturno con red eléctrica podría constituir un obstáculo económico relevante: un sistema que es técnica y operativamente flexible, pero que en la práctica podría exceder la capacidad de pago de los agricultores después del primer mes de facturación.

Por ello, la recomendación es diseñar los sistemas bajo un esquema solar-primero, privilegiando el bombeo durante el día y utilizando el respaldo de red únicamente como medida excepcional o

de emergencia. Esta estrategia preserva la resiliencia técnica sin trasladar un riesgo financiero adicional a los usuarios finales.

4.4. Efecto de la inversión en riego por goteo sobre la factibilidad y el financiamiento del proyecto

Un sistema de riego por goteo para 1 mza (0.7 ha), sin incluir bombas ni almacenamiento, tiene un costo aproximado entre GTQ 70,000 y GTQ 80,000, considerando tuberías principales, válvulas, filtros, accesorios y la cintilla de riego. Este rango sirve como referencia general; puede variar según calidad de materiales, topografía, distancia a la fuente de agua y diseño específico.

Las cintillas, que representan cerca del 30% del costo total del sistema, deben reemplazarse cada tres años debido al desgaste por uso y exposición a las condiciones del campo. Este costo recurrente es importante incluirlo en la planificación de operación y mantenimiento del sistema.

Como se observó en el análisis económico, el costo de la infraestructura es un factor decisivo tanto para determinar la factibilidad de los proyectos como para definir el monto de los créditos necesarios. Dado que los agricultores enfrentan limitaciones de liquidez y ciclos productivos con ingresos variables, para que puedan asumir y pagar estos créditos de manera sostenible, los sistemas de riego tendrían que ser financiados en su totalidad, evitando desembolsos iniciales elevados que comprometan su capacidad de pago y la viabilidad del proyecto.

4.5. Condiciones y costos de perforación de pozos artesanales

Para lograr un diseño funcional y sostenible de los sistemas de bombeo, **se debe considerar la profundización de los pozos existentes**, especialmente en aquellas zonas donde el acceso al agua subterránea es limitado o poco confiable. Todos los productores entrevistados indicaron que quieren profundizar sus pozos.

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 noviembre de 2025, el precio por metro en terrenos blandos oscila entre GTQ30 y GTQ60, 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 GTQ150 y GTQ600 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, resulta fundamental considerar el aforo de los pozos, ya que constituye un requisito técnico indispensable para el adecuado diseño del sistema de bombeo. Durante las visitas de campo se constató que ninguno de los pozos artesanales evaluados cuenta con un aforo realizado. En Guatemala, el costo de este procedimiento oscila entre GTQ 1,500 y GTQ 5,000, en función del tipo de pozo y de la duración de la prueba.

Tabla 8. 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

4.6. Limitaciones del análisis financiero y criterios socioeconómicos complementarios

Si bien las simulaciones financieras permiten identificar los escenarios en los que el sistema de bombeo solar resulta económicamente viable, es importante señalar que la población objetivo del proyecto está conformada, en su mayoría, por agricultores de muy bajos ingresos, cuyos niveles económicos se sitúan significativamente por debajo de los umbrales que permiten que dichas simulaciones resulten viables bajo criterios financieros tradicionales. En este contexto, la justificación del proyecto no puede basarse exclusivamente en la rentabilidad financiera directa, aun cuando ciertos escenarios presenten valores positivos de VPN y tasas internas de retorno superiores a la tasa de descuento.

En consecuencia, la evaluación económica del sistema debe complementarse con un enfoque orientado a los beneficios sociales y estratégicos, tales como la mejora de la seguridad alimentaria, el aumento de la resiliencia frente al cambio climático, la diversificación y generación de ingresos, la reducción de la vulnerabilidad energética y el fortalecimiento de los medios de vida rurales. Estos beneficios, aunque no siempre se reflejan de manera directa en los indicadores financieros convencionales, constituyen elementos centrales para la sostenibilidad y pertinencia del proyecto.

Bajo este enfoque, resulta fundamental que los proyectos piloto incorporen un sistema sólido de monitoreo y evaluación, que incluya el establecimiento de una línea base y el seguimiento sistemático de indicadores como la productividad agrícola, el incremento de los ingresos familiares, las mejoras en el balance nutricional, el número de personas beneficiadas y el potencial de réplica del modelo. La generación de evidencia cuantificable será clave para demostrar el impacto real del sistema y justificar futuras escalas de inversión, tanto desde el sector público como desde la cooperación internacional.

Adicionalmente, la investigación de campo pone de manifiesto una brecha estructural en el acceso al financiamiento. Los créditos agrícolas formales disponibles en el país suelen estar orientados a productores con actividad comercial, ingresos monetarios estables y, en muchos casos, historial crediticio y garantías reales. Sin embargo, el grupo meta del proyecto está conformado en gran parte por mujeres agricultoras de subsistencia, cuyos ingresos son bajos, irregulares o no formalizados, lo que limita su acceso a los mecanismos tradicionales de crédito.

Ante esta situación, la viabilidad económica del proyecto depende en gran medida de la exploración e implementación de mecanismos financieros alternativos, tales como esquemas de garantía solidaria, modalidades de pago en especie, subsidios escalonados o alianzas con programas de desarrollo rural que ya trabajan con poblaciones en situación de subsistencia. En

ausencia de instrumentos financieros adaptados a este perfil, existe el riesgo de que la tecnología solar resulte accesible únicamente para productores con mayor capital, reproduciendo las desigualdades que el proyecto busca reducir.

5. Conclusiones

El presente informe ha permitido avanzar en la selección de tecnologías de riego solar (SPIS) más adecuadas para su implementación piloto en el corredor seco de Baja Verapaz, Guatemala. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas del análisis técnico, económico y social realizado:

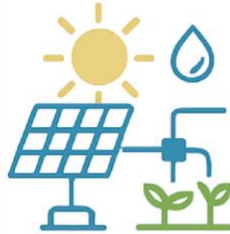
1. **Viabilidad técnica de los SPIS:** Se han identificado configuraciones tecnológicas representativas que responden a las necesidades de pequeños agricultores en Rabinal y San Miguel Chicaj. Los diseños propuestos, que incluyen sistemas de bombeo solar con estanques intermedios y sistemas híbridos solar-red, ofrecen soluciones adaptadas a las condiciones agroclimáticas y sociales de la región.
2. **Impacto del subsidio en la viabilidad económica:** Los análisis económicos realizados demuestran que el subsidio es un factor clave para la adopción inicial de los SPIS. Niveles de subsidio adecuados pueden reducir significativamente la carga financiera inicial, mejorar los indicadores económicos y facilitar la transición hacia esquemas más autosostenibles.
3. **Importancia de la reinversión:** La sostenibilidad de los sistemas SPIS depende de una reinversión mínima del 20% anual para garantizar el mantenimiento y la reposición de componentes críticos.
4. **Rol del ingreso anual del productor:** El ingreso anual de los agricultores es determinante para la adopción de los SPIS. Se estima que el umbral mínimo de ingreso sostenible para la implementación de estos sistemas se encuentra entre GTQ 40,000 y GTQ 50,000 anuales, dependiendo de las condiciones de financiamiento y subsidio.
5. **Limitaciones del financiamiento tradicional:** Los pequeños agricultores, especialmente las mujeres en situación de subsistencia, enfrentan barreras significativas para acceder a créditos agrícolas formales. Esto subraya la necesidad de explorar mecanismos financieros alternativos adaptados a sus características y capacidades.
6. **Beneficios sociales y estratégicos:** Aunque algunos escenarios presentan viabilidad económica, el impacto del proyecto debe evaluarse también desde una perspectiva social y estratégica. Los beneficios en términos de seguridad alimentaria, resiliencia climática, generación de ingresos y fortalecimiento de medios de vida rurales son fundamentales para justificar la inversión y garantizar la sostenibilidad del proyecto.
7. **Recomendaciones para la implementación piloto:** Es crucial que los proyectos piloto incluyan un sistema de monitoreo y evaluación robusto, que permita medir el impacto real del sistema en términos de productividad agrícola, ingresos familiares, balance nutricional y replicabilidad del modelo. Además, se recomienda establecer esquemas de financiamiento adaptados y estrategias de operación que prioricen el uso de energía solar para minimizar costos operativos.

En conclusión, la implementación de tecnologías de riego solar en el corredor seco de Baja Verapaz representa una oportunidad significativa para mejorar la resiliencia de los pequeños agricultores frente al cambio climático y fortalecer la seguridad alimentaria en la región. Sin embargo, su éxito dependerá de un enfoque integral que combine soluciones técnicas viables, apoyo financiero adecuado y estrategias de gestión comunitaria que garanticen la sostenibilidad económica y social de los sistemas.

Anexo A. Fichas técnicas



Ministerio de
**Ambiente y
 Recursos Naturales**



SISTEMA DE RIEGO SOLAR

Diseño de Referencia -- Maíz en Temporada Seca
 Soluciones resilientes para riego agrícola a pequeña escala

Descripción General

Sistema autónomo de bombeo solar para riego agrícola con doble bombeo



Beneficios

- Costos operativos reducidos
- Mayor producción
- Diversificación de cultivos

Componentes Principales

- Panel solar fotovoltaico: 1.8 - 2.4 kWp
- Controlador/Inversor con MPPT
- Bombas solares FV: 1.4-2 Hp
- Estanque de almacenamiento: 2x Demanda diaria
- Sistema de irrigación por goteo

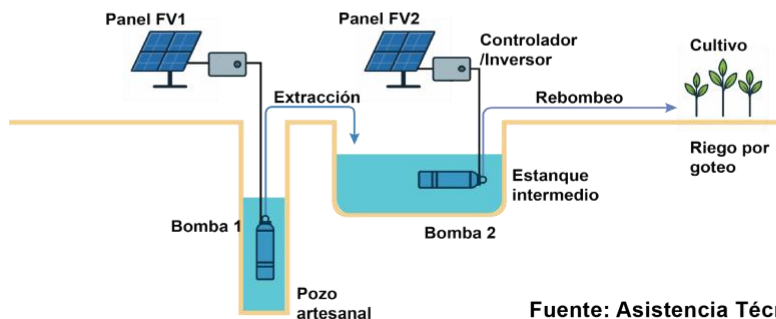


Datos Técnicos y de Eficiencia

Área de cultivo	0.35 ha (0.5 mz)
Demanda de agua	16 m ³ /día
Carga Dinámica Total (CDT)	30 - 50 m
Eficiencia de sistema FV	25%
Eficiencia de riego por goteo	90%

Operación y Mantenimiento

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de paneles • Revisión de conexiones • Revisión de bombas | Usuario
Técnico local
Instalador/Proveedor |
|---|--|



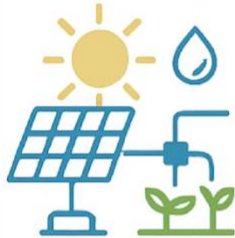
Sostenibilidad

- Cero combustible
- No CO₂
- Bajo mantenimiento
- Mayor resiliencia a sequías

Fuente: Asistencia Técnica CTCN- MARN Guatemala
 Ficha Técnica Versión 1.0 - 2025



Ministerio de
**Ambiente y
 Recursos Naturales**



SISTEMA DE RIEGO SOLAR

Diseño de Referencia -- Maíz en Temporada Seca
 Soluciones resilientes para riego agrícola a pequeña escala

Descripción General

Sistema híbrido de bombeo para riego agrícola con doble bombeo

- Solar
- Red eléctrica



Beneficios

- Costos operativos reducidos
- Mayor producción con pozos de baja recarga

Componentes Principales

- Panel solar fotovoltaico: 1.8 - 2.4 kWp
- Controlador/Inversor con MPPT
- Bombas solares FV: 1.4-2 Hp
- Estanque de almacenamiento: 2x Demanda diaria
- Sistema de irrigación por goteo

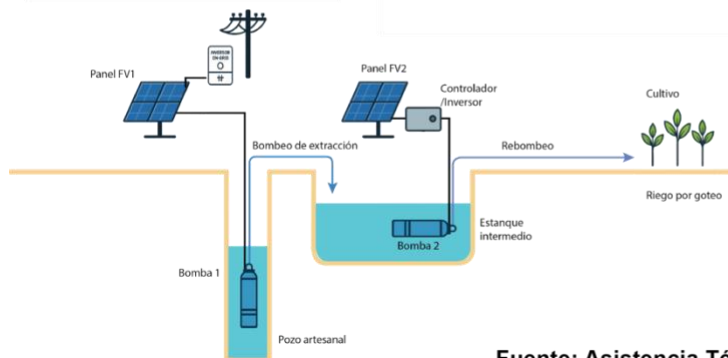


Datos Técnicos y de Eficiencia

Area de cultivo	0.35 ha (0.5 mz)
Demanda de agua	16 m ³ /día
Carga Dinámica Total (CDT)	30 - 50 m
Eficiencia de sistema FV	25%
Eficiencia de riego por goteo	90%

Operación y Mantenimiento

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de paneles • Revisión de conexiones • Revisión de bombas | Usuario
Técnico local
Instalador/Proveedor |
|---|--|



Sostenibilidad

- Bajo mantenimiento
- Mayor resiliencia a sequías


Fuente: Asistencia Técnica CTCN- MARN Guatemala
 Ficha Técnica Versión 1.0 - 2025



tta Energy
that
drives
change

 [Avinguda Meridiana, 153 - Barcelona, ESPAÑA](#)

 +34 93 446 3234

 ttaenergy.com

 [TTA - Trama TecnoAmbiental](#)