



Universidad de Concepción

CARTILLAS TÉCNICAS CRHIAM 2024

Criterios de diseño y manejo para microriego con el uso de energía solar

Julio Gajardo - Eduardo Holzapfel - Luciano Quezada
Gladys Vidal - Davis Lara



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015
ANID/FONDAP/1523A0001

CARTILLAS TÉCNICAS CRHIAM 2024

Edición impresa: 2810-7527

Edición en línea: 2810-7535

DIRECTORA

Gladys Vidal Sáez

COMITÉ EDITORIAL

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

CARTILLA:

Criterios de diseño y manejo para
microriego con el uso de energía solar

AGRADECIMIENTOS

Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y
la Minería (CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295,
Barrio Universitario,
Concepción, Chile
Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl

AUTORES

JULIO GAJARDO

Ingeniero Civil Agrícola.
Universidad de Concepción.

EDUARDO HOLZAPFEL

Ingeniero Agrónomo, Universidad de Concepción.
PhD en Ingeniería, Universidad de California Davis, Estados Unidos.
Profesor Titular/Emérito, Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Asociado CRHIAM.

LUCIANO QUEZADA

Ingeniero Civil Agrícola.
Dr.(c) en Recursos Hídricos y Energía para la Agricultura.
Universidad de Concepción.

GLADYS VIDAL

Doctora en Ciencias Químicas.
Programa en Biotecnología Ambiental.
Universidad Santiago de Compostela, España.
Profesora Titular Facultad de Ciencias Ambientales.
Universidad de Concepción.
Directora CRHIAM.

DAVIS LARA

Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción.
Dr. en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos en la Agricultura
Universidad de Concepción.
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción

RESUMEN

Este documento presenta un estudio que tiene como objetivo determinar las relaciones entre demanda hídrica y disponibilidad de energía solar fotovoltaica, para establecer criterios de diseño, manejo y operación en sistemas de microriego, tomando como base el cultivo de vides en el área de secano en la comuna de Ninhue, Región de Ñuble, Chile. Para ello, se evaluaron dos alternativas de bombeo, la primera mediante una bomba solar de corriente continua y la segunda mediante una bomba convencional con variador de frecuencia de corriente alterna, en predios de 0,5 y 3 hectáreas. Para esto, se implementó un sistema aislado de bombeo fotovoltaico directo, utilizando módulos fotovoltaicos monocristalinos marca Canadian Solar (CS3W-455MS) de 455 Watt de potencia máxima conectados en serie, inclinados a 20° y orientados hacia el norte.

De dichos módulos se obtuvieron datos de radiación horaria para el sitio de estudio, desde la plataforma Explorador Solar del Ministerio de Energía, con lo cual se ajustó una distribución horaria del riego para un cultivo de vides (*Vitis vinifera*), tomando el mes de enero como referencia, dado que es el de máxima demanda hídrica y disponibilidad energética.

Los antecedentes permitieron establecer, al momento de diseñar, una disponibilidad de 7 a 8 horas de riego al día para el mes de máxima demanda. Los resultados permiten determinar que la disponibilidad energética, respecto de los costos asociados, tiene efecto en el área de riego simultáneo, logrando determinar que la alternativa más económica, desde el punto de vista energético, es mediante bombas solares, ya que el kilowatt hora tiene valores entre los 194 a los 203 pesos para esta alternativa. En cambio para bombas convencionales con variador de frecuencia, varía entre los 214 a los 236 pesos por kilowatt hora.

INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica toma cada vez más importancia en la agricultura chilena, pudiendo adaptarse a condiciones de no disponibilidad de otras fuentes de energía, dado que los costos de la energía en Chile son de los más altos de Latinoamérica y está por sobre el promedio de los demás países de la OCDE (Cooper, 2012).

La integración de sistemas fotovoltaicos para el suministro de energía en sistemas de bombeo para riego presenta una serie de ventajas significativas. Estas incluyen costos de mantenimiento y operación reducidos, la capacidad de proporcionar energía en áreas remotas y la eliminación de emisiones contaminantes.

El sector agrícola demanda una gran cantidad de energía para poder cumplir con sus procesos productivos. Los costos energéticos de estos procesos productivos como el riego, los mecanismos de control de heladas y los diferentes procesos agroindustriales, son factores importantes en los costos de muchas de las empresas agrícolas. Debido a lo anterior, el sector está buscando soluciones para disminuirlos, especialmente a través de la eficiencia energética. Es así como últimamente se han aventurado en algunas soluciones más novedosas e innovadoras, como los sistemas de energías renovables no convencionales "ERNC" (Cooper, 2012).

A nivel mundial, la agricultura es responsable del consumo de entre un 70% y un 80% del agua dulce. En el caso de Chile, este sector es responsable de un porcentaje similar del total nacional, abasteciendo una superficie regada de 1,1 millones de hectáreas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos (INE, 2007).

Estos porcentajes dejan en evidencia la necesidad de ahorrar agua, lo que ha motivado al sector agrícola a buscar alternativas que promuevan su sustentabilidad y minimicen su impacto ambiental. Afortunadamente, el avance en conocimientos y tecnologías ofrece cada vez más herramientas para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura.

Esta eficiencia de recursos hídricos se explica, en su mayor parte, por las nuevas tecnologías de riego, como el riego localizado, mediante sistemas por goteo o aspersión, sistemas mucho más eficientes que los sistemas de riego convencionales (Medrano *et al.*, 2007).

Uno de los sistemas que han mejorado la eficiencia del riego es el riego localizado. Este consiste en un sistema presurizado que permite aplicar pequeños volúmenes de agua al cultivo. El censo realizado en 2007 muestra una superficie regada a través de microriego de casi 18.000 ha, notando un aumento de un 18% desde 1997 (INE, 2007).

Esto se debe a las mltiples ventajas que genera su implementacin, mejorando aun ms la distribucin del agua en el terreno, con el fin de favorecer un desarrollo homogneo del cultivo, permitiendo la obtencin de mayores y mejores rendimientos (Lpez-Olivar, 2016), considerando un ptimo manejo del sistema de riego.

El microriego tiene como objetivo primordial optimizar el uso del recurso hdrico, para lo cual es necesaria una gran cantidad de energa, que puede ser obtenida de diferentes fuentes. Por lo tanto, existe una problemtica con respecto al aislamiento energtico para suplir las necesidades hdricas de los cultivos. Actualmente, son reducidos los estudios en cuanto al uso de energa solar aplicadas al microriego y prcticamente nulos en cuanto al desarrollo de criterios de diseo, por lo que este tema resulta innovador y poco explorado.

PLANIFICACIÓN DE RIEGO

En la agricultura, cuando la lluvia no es suficiente para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos, se recurre al riego. La cantidad de agua requerida depende del balance hídrico del cultivo, influenciado por diversos factores como el tipo de cultivo, el suelo y el clima. La programación del riego se basa en la evapotranspiración del cultivo, la cual varía dependiendo según las condiciones climáticas y el estado fenológico de éste. La programación del riego se realiza basándose en la evapotranspiración, la eficiencia de aplicación del riego, la capacidad de retención de agua del suelo en la zona radicular, el criterio de riego y otros factores asociados a la operación del sistema. Los sistemas de riego se diseñan para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo durante periodos críticos de demanda, ajustándose posteriormente a periodos de menor demanda.

CONSUMO ENERGÉTICO EN EL RIEGO

Los sistemas de riego presurizado requieren una gran cantidad de energía para su funcionamiento en sus diferentes componentes de operación (filtros, fertirrigación, tuberías, emisores, entre otros). El costo de la energía eléctrica es uno de los factores críticos en el diseño de los sistemas de riego. Actualmente, la mayoría de los sistemas dependen de generadores alimentados por combustibles fósiles (Barrueto *et al.*, 2018), lo que no solo resulta costoso, sino también contaminante. Ante esta problemática, surge la oportunidad de integrar energías renovables no convencionales (ERNC), como la solar fotovoltaica, la cual es una alternativa más sostenible y potencialmente más rentable. Su implementación también puede contribuir positivamente al medio ambiente al reducir las emisiones de carbono y la dependencia de los combustibles fósiles.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Un panel fotovoltaico consiste en un arreglo de celdas fotovoltaicas conectadas (en serie o paralelo), el cual permite convertir la radiación solar en energía eléctrica, gracias a la diferencia de potencial que se genera entre los terminales del arreglo, debido al efecto fotoeléctrico que se produce en las juntas de las celdas, típicamente de silicio, con la incidencia de fotones de luz sobre ellas. Un arreglo de varios paneles dispuestos de forma paralela y/o en serie produce una corriente y voltaje distintos al de un solo panel.

Cuando se conectan paneles solares en serie, se unen positivos con negativos de manera secuencial, lo que aumenta el voltaje total del sistema, mientras que la corriente permanece constante. Por otro lado, al conectar los paneles en paralelo, se mantienen los voltajes individuales de cada panel, pero la corriente total aumenta, ya que las corrientes de cada panel se suman. Esto se debe considerar para que las características de voltaje y corriente generadas por el arreglo sean compatibles con los valores máximos permisibles para el sistema de bombeo.

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN SISTEMAS DE RIEGO

Los sistemas de bombeo basados en energa solar fotovoltaica se han desarrollado rpidamente durante la ltima dcada, principalmente debido a la progresiva reducci3n del costo de los mdulos fotovoltaicos y al desarrollo de nuevas soluciones electr3nicas para el acondicionamiento de energa (L3pez- Luque *et al.*, 2015).

La utilizaci3n de energa solar fotovoltaica para la alimentaci3n de sistemas de bombeo para riego posee una serie de ventajas, como bajos costos de mantenimiento y de operaci3n de los sistemas, permitir la disponibilidad de energa en lugares remotos y no tener emisiones de contaminantes. Las principales desventajas de estos sistemas son la variabilidad del recurso solar durante el da y en el transcurso del a3o, lo cual es determinante en el dimensionamiento del sistema, y la alta inversi3n inicial que se requiere para su implementaci3n.

Sin embargo, en Chile existen numerosos concursos de entidades tales como la Comisi3n Nacional de Riego (CNR) y el Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario (INDAP), donde agricultores pueden postular a financiamiento para la realizaci3n de proyectos de riego utilizando ERNC. Para el caso de proyectos de riego presurizado, donde la conexi3n a la red el3ctrica no es factible desde el punto de vista t3cnico o econ3mico, se hace necesaria la implementaci3n de una fuente aislada de generaci3n de energa el3ctrica, la cual puede ser provista mediante un arreglo fotovoltaico aislado.

Uno de los principales problemas del bombeo fotovoltaico aislado es la variaci3n del recurso solar a lo largo del da. La potencia provista por el arreglo fotovoltaico depende directamente de la radiaci3n incidente sobre el panel. Cuando la radiaci3n solar alcanza cierto valor, la demanda el3ctrica por parte del sistema de bombeo es constante y el resto de la energa generada es disipada. Fuera de este rango horario, la potencia disponible para el equipo de bombeo se ve limitada por la baja radiaci3n. Esto provoca cambios en el punto de operaci3n de la bomba, obteniendo un caudal menor al obtenido cuando trabaja a potencia constante.

Debido a esto, el manejo de un sistema de riego, en las horas de baja radiaci3n, se hace m3s complejo ya que se tiene un menor caudal disponible. La variaci3n en la irradiancia incidente sobre el panel provoca cambios en el punto de operaci3n de la bomba, obteniendo variaciones en la presi3n y el caudal del sistema. Por lo cual, un buen diseo basado en diferentes criterios de manejo y operaci3n y un manejo diferenciado, en cuanto al tama3o y requerimientos del sector de riego, conlleva a suplir de buena manera las necesidades h3dricas del cultivo.

Muchos de los sistemas de riego fotovoltaicos bombean agua a un depósito o tanque y, luego, permiten que el agua fluya a los campos de cultivo solo por la fuerza de la gravedad. A diferencia de estos, el sistema propuesto bombea el agua desde un pozo o un embalse estacional directamente al sistema de distribución de riego (López-Luque *et al.*, 2015).

Las dos alternativas de sistemas de riego fotovoltaico están compuestas por una matriz fotovoltaica que proporciona electricidad para alimentar las bombas de velocidad variable (la primera mediante una bomba solar "corriente continua" y la segunda mediante una bomba convencional con un variador de frecuencia "corriente alterna"). El agua se aplica a los cultivos a través de emisores autocompensados. El punto de funcionamiento de la bomba convencional está controlado por un variador de frecuencia, que coincide con la presión y flujo según la irradiancia solar instantánea (Merida *et al.*, 2018). Siempre se regará de día ya que el sistema es *off grid* directo (sin banco de baterías).

SISTEMA DE MICRORIEGO IMPULSADO CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Para llevar a cabo el estudio de caso, se seleccionó un sistema de microriego impulsado con energa solar fotovoltaica para regar vides en una zona de secano donde puede tener un gran efecto en la produccin.

El estudio se llev a cabo en la zona de la cordillera de la costa, especficamente en la comuna de Ninhue, ubicada en la Regi3n de Ñuble (Figura 1). Esta 3rea se caracteriza por su principal actividad agrcola, la viticultura. Los viñedos en esta regi3n son generalmente de pequeas propiedades, y muchas veces sujetos a precarias condiciones de subsistencia.

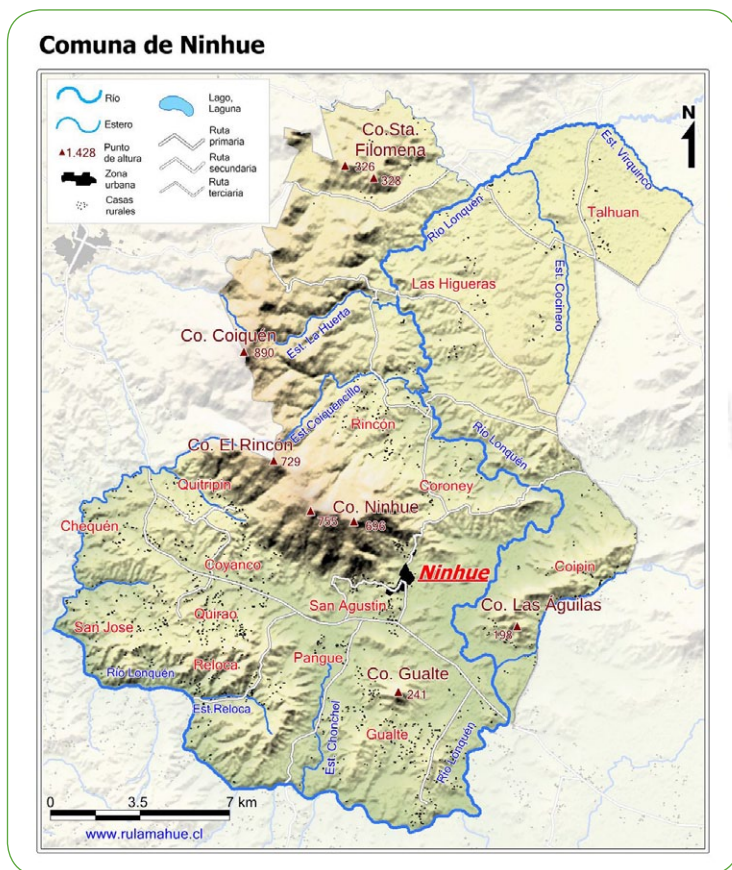


Figura 1. Mapa de la comuna de Ninhue. Fuente: ruralmahue.cl

Para desarrollar y evaluar criterios de diseño en sistemas de microriego con el uso de energía solar, es crucial determinar los requerimientos hídricos específicos. También, obtener datos de evapotranspiración, proporcionados por la base de datos de estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Otras consideraciones son el tipo de cultivo *Vitis Vinifera*, el tipo de suelo, como factores físicos y medioambientales. Todo esto con la finalidad de determinar la demanda efectiva del cultivo que se busca regar y así garantizar un uso eficiente del agua y la energía en el sistema de riego.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DEL SUELO

El suelo se identifica como arcilloso de la serie cauquenes, lo que conlleva características físico-hídricas particulares. Esto abarca la capacidad de retención de agua del suelo a capacidad de campo (θ_{cc}), que es la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener después de saturarse y drenarse. Además, se considera el punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), que indica el nivel de sequedad del suelo en el que las plantas ya no pueden extraer agua.

La densidad aparente (D_{ap}) se refiere a la compacidad del suelo, teniendo en cuenta tanto las partículas sólidas como los espacios porosos. La profundidad de la estrata (z) indica hasta qué profundidad el suelo conserva estas características mencionadas anteriormente. La velocidad de infiltración (V_i) describe la rapidez con la que el agua penetra en el suelo. Estos aspectos son esenciales para comprender la interacción del suelo con el agua y su impacto en la eficiencia del riego, lo que resulta crucial para el diseño y la gestión adecuados del sistema de riego en el proyecto. Estos valores se detallan en la Tabla 1

Tabla 1. Contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}), contenido de humedad a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), densidad aparente (D_{ap}), profundidad de estrata (z) y velocidad de infiltración básica del suelo (V_i).

Serie	Cauquenes	Cauquenes	Cauquenes
θ_{cc} (g/g)	0.25	0.27	0.27
θ_{PMP} (g/g)	0.16	0.21	0.23
D_{ap} (g/c ³)	1.45	1.49	1.51
z (m)	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.7
V_i (mm/hr)	15	15	15

- **Profundidad radical**

El sistema de raices de la *Vitis Vinifera* puede extenderse ampliamente tanto en superficie como en profundidad, alcanzando longitudes de ms de 3 metros. Sin embargo, la mayor concentracin de raices encargadas de la absorcin de agua se encuentra tpicamente en los primeros 70 cm del suelo. Adem s, un indicador importante de la sensibilidad al estr s h drico, conocido como criterio de riego (CR), tiene un valor de 0,5 para las vides, lo que indica una tolerancia relativa moderada a la falta de agua.

- **Agua aprovechable que soporta el suelo**

El agua aprovechable en el suelo (HA) corresponde al agua almacenada entre la capacidad de campo (θ_{cc}) y el punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) en la zona efectiva de extraccin del cultivo. El cual se calcula mediante la diferencia entre el contenido de humedad volumtrico a capacidad de campo (θ_{cc}) y el contenido de humedad volumtrico en punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), esto multiplicado por la profundidad radical efectiva *Zrad*, en este caso de estudio, el resultado obtenido para altura de agua aprovechable fue de 54 mm.

AN LISIS PARA EL REQUERIMIENTO DEL CULTIVO

EVAPORACI N DE REFERENCIA

La evaporacin de referencia se refiere a la cantidad de agua, expresada en milmetros por da (mm da^{-1}), que se evapora efectivamente desde la superficie del suelo y se transpira por la cubierta vegetal. Estos datos pueden obtenerse de diversas estaciones climatolgicas a lo largo del pas y su valor var a dependiendo de la localidad en la cual se encuentran.

Para este estudio, se utiliz la evaporacin de referencia que satisfac a el 85% de la probabilidad durante el periodo de mxima demanda h drica (enero), utilizando datos hist ricos del periodo 2017-2021, con un intervalo de 5 das consecutivos. Se eligi este periodo porque es cuando la planta comienza a responder al d ficit de agua. Los datos se obtuvieron de la estacin de agroclimatolog a del INIA, ubicada en la localidad de Ninhue. El valor obtenido utilizando la distribucin de Weibull para el 85% de probabilidad durante 5 das consecutivos en la temporada de riego fue de $7,25 \text{ mm da}^{-1}$.

PORCENTAJE DE COBERTURA O SOMBREO

Un parmetro necesario para determinar la demanda de agua del frutal es el factor de cobertura (FC) y la fraccin de sombreo (P) que representan el grado de intercepci n de la radiacin solar por parte de las hojas, integrando edad, densidad de plantacin, manejo de poda y orientacin de la plantacin (Holzapfel *et al.*, 2020). Para calcular el factor de cobertura (FC), se requieren obtener valores tanto de la fraccin

de sombreado al mediodía solar (P) en porcentaje asociado a los coeficientes F1 y F2, los cuales son coeficientes empíricos que permiten estimar la asignación óptima del agua en función del crecimiento del huerto (Fereres *et al.*, 1981).

Se consideró un porcentaje de cobertura o sombreado del 60%, que se utiliza para determinar la evapotranspiración del cultivo cuando la planta se encuentra en su etapa adulta. Además, se aplicaron los coeficientes específicos para las vides, con un valor de F1 de 0,0102 y un valor de F2 de 0,11.

VOLUMEN DE AGUA QUE REQUIERE EL FRUTAL

Para determinar el volumen de agua requerido por las vides, primero se debe determinar el factor de cobertura (FC), utilizando los valores que fueron mencionados con anterioridad. Posterior a esto, para obtener la evapotranspiración de cultivo es necesario multiplicar el factor de cobertura (0.7) por la evapotranspiración de referencia ($7,25 \text{ mm día}^{-1}$) obteniendo que la evapotranspiración de cultivo es de $5,23 \text{ mm día}^{-1}$. En el predio, se establecerá un marco de plantación para las vides de $2,5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, lo que significa que la distancia entre hileras será de $2,5 \text{ m}$, y la distancia entre plantas en la hilera será de 1 m .

Utilizando la evapotranspiración de cultivo ya determinada y teniendo en cuenta el marco de plantación de las vides, podemos calcular el volumen de agua requerido por cada planta. Este cálculo se realiza multiplicando la evapotranspiración del cultivo por el área de plantación. Para este caso específico, el volumen requerido por planta al día es de $13,08 \text{ (L árbol}^{-1} \text{ día}^{-1}\text{)}$.

VOLUMEN TOTAL APLICAR

Al momento de determinar el volumen total de agua a aplicar por día en las vides, se debe considerar la eficiencia del sistema de riego a utilizar, ya que no hay métodos de riego que permitan aplicar el agua con un 100% de eficiencia. Para este proyecto se utilizará un sistema de riego por goteo, cuya eficiencia se sitúa en un rango de 65% a 95% (Holzapfel *et al.*, 2020).

Para el diseño se utilizará un valor de un 90% de eficiencia en la aplicación del agua. Para determinar el volumen total a aplicar por planta, se divide el volumen requerido por el frutal ($13,08 \text{ L árbol}^{-1} \text{ día}^{-1}$) entre la eficiencia de riego (0,9), lo que arroja un volumen total de agua a aplicar a la planta diariamente de $14,54 \text{ L árbol}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DE EMISORES

PATRÓN DE HUMEDECIMIENTO

El patrón de humedecimiento describe el diámetro mojado de suelo en base al caudal entregado por el emisor, en este caso, el caudal del emisor es de 2 L/h. Para determinar el diámetro mojado del suelo, se utiliza una relación específica, como se presenta en la Figura 2.

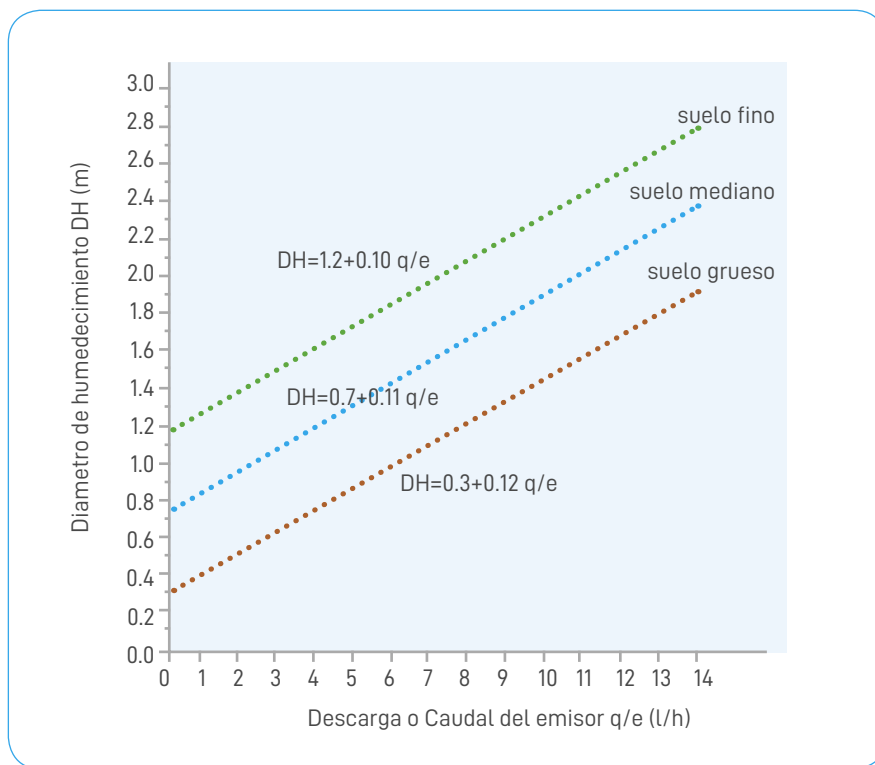


Figura 2. Relación entre el diámetro de humedecimiento (DH) en función del caudal del emisor (q/e). Fuente: Karmeli, (1985).

Dado que el suelo del predio es arcilloso, se empleará la relación correspondiente al suelo mediano. Esta relación nos proporciona un diámetro de 0,92 m como resultado.

Para el cálculo del porcentaje de área de humedecimiento para gotero se requieren datos de números de emisores, diámetro humedecido, distancia sobre hileras y distancia entre hileras.

NÚMERO DE EMISORES POR PLANTA

Para determinar el número de emisores por planta, se deben considerar varios factores. Uno de estos es el área humedecida, es recomendado que el porcentaje de esta área se encuentre entre un 50% hasta un 60%, para realizar de buena manera el riego (Holzapfel *et al.*, 2020). Los resultados analizados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis del porcentaje de suelo mojado con distintas configuraciones para los emisores.

Caudal del emisor (L/h)	Diámetro de humedecimiento (m)	Nº emisores	Área mojada por emisor (m ²)	Área mojada por los emisores (m ²)	Suelo mojado (%)
2	0,92	2	0,7	1,3	53,2
4	1,14	1	1,0	1,0	40,8
8	1,58	1	2,0	2,0	78,4

Una vez que se ha establecido la cantidad de emisores por planta, se procede a determinar el tiempo de riego necesario para reponer el agua evapotranspirada por el cultivo. Este tiempo se calcula dividiendo el volumen total de agua a aplicar entre el número de emisores por planta y el caudal del emisor. El resultado de este cálculo nos indica que se requiere un tiempo de funcionamiento de los emisores de 3,6 horas para cada riego. Este paso es fundamental para garantizar un suministro adecuado de agua a las plantas y satisfacer sus necesidades hídricas del cultivo.

FRECUENCIA DE RIEGO

La frecuencia de riego hace referencia a la cantidad de veces que se riega una planta en un determinado periodo de tiempo. La frecuencia está influenciada por las condiciones físico-hídrica del suelo, el método de riego utilizado y la capacidad de retención de agua en el suelo. Se determina dividiendo el producto de la altura de agua aprovechable (54 mm), el área humedecida (0,532) y el criterio de riego (0,5) entre la evapotranspiración del cultivo (5,23 mm día⁻¹).

En este caso particular, se ha establecido una frecuencia de riego de 2 días. Este aspecto es fundamental para asegurar un suministro adecuado de agua a las plantas y mantener su salud y desarrollo óptimos.

GOTERO ÓPTIMO ECONÓMICO

Al momento de seleccionar un emisor es necesario realizar un análisis económico para determinar cuál es la opción más conveniente. Esto implica examinar diferentes emisores, como los de 2 L h⁻¹, y evaluar tanto sus costos fijos como variables. La suma de estos costos proporciona el costo total anual por hectárea.

En este proyecto de estudio, se compararán los emisores de la marca Netafim, específicamente los modelos Dripnet PC de 16 mm y 20 mm de espesor.

COSTOS FIJOS ANUALIZADOS PARA GOTEROS

Los costos fijos asociados a la selección de emisores dependen de la vida útil del emisor, la tasa de interés, la cantidad de emisores por planta, el costo inicial del emisor y el costo de instalación. Estos datos económicos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Número de años (n), tasa de interés (i), costo de instalación (Ci) y costo del emisor (Ce).

Datos económicos	
n (años)	20
i (%)	8
Ci (\$)	10
Ce (\$)	165

Fuente: Tasa de interés Banco Central, (2021).

Con los valores previamente mencionados se calcula el factor de recuperación del capital (FRC), el cual es una medida que indica cuánto dinero se recupera por cada unidad monetaria invertida, en este caso el factor es 0.102. Este valor es fundamental para evaluar la viabilidad económica de la inversión en emisores de riego y determinar su rentabilidad a lo largo del tiempo.

Es importante realizar una búsqueda respecto a los precios de los emisores de distintas marcas disponibles en el mercado nacional para goteros autocompensados de 2 L h^{-1} . Este análisis permitirá determinar el costo fijo de cada emisor disponible en el mercado y, en última instancia, seleccionar la opción más rentable, la cual nos da como resultado para los 2 escenarios de 0,5 y 3 hectáreas, el emisor Dripnet PC 16 mm autocompensado de 2 L h^{-1} es el óptimo económico en los 2 escenarios.

COSTOS VARIABLES PARA GOTEROS

Para determinar el costo variable de los emisores, es necesario tener en cuenta varios factores. Esto incluye la vida útil del emisor, la tasa de interés, así como también las horas de operación durante la temporada de riego, la superficie regada de forma simultánea, la eficiencia de la bomba utilizada, el costo del combustible empleado y la potencia generada por unidad de combustibles.

Con estos valores se calcula el factor de costo equivalente (FCE), que es una medida que convierte todos los costos futuros de un proyecto en un solo valor presente, facilitando así la comparación entre diferentes opciones de inversión. Además, a partir del FCE también se puede determinar el costo anual equivalente de energía (CAEE), que representa el costo promedio por año de la energía utilizada en un proyecto.

DIMENSIONAMIENTO DE LA SUBUNIDAD

En general, un sistema de riego por goteo se compone de una caseta central, tuberías de distribución, y subunidades. Las subunidades están integradas por una válvula de control, tubería auxiliar, secundario o porta laterales, laterales y emisores que están emplazados en los laterales. Un esquema del sistema se entrega en la figura 3.

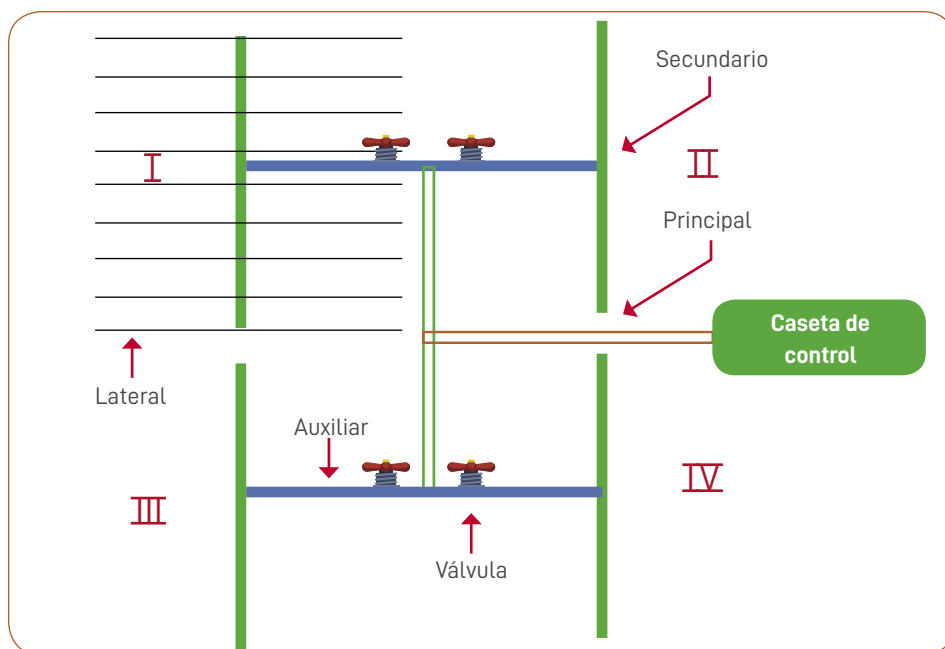


Figura 3. Esquema de riego por goteo, caseta de control, matriz principal, auxiliar, secundario, lateral y válvula, subdividida en cuatro subunidades de riego. **Fuente:** elaboración propia.

DIMENSIONAMIENTO DEL LATERAL

Para dimensionar el largo máximo del lateral, se consideran diferentes diámetros de tubería, como 16 mm y 20 mm. La máxima pérdida de carga permitida en el lateral se establece como un 15% de la presión de operación del emisor, asegurando así una buena uniformidad en la distribución del agua durante el riego.

Para determinar las pérdidas de carga en el lateral, se emplea un enfoque iterativo en el que se ajusta progresivamente la longitud del lateral hasta alcanzar la máxima pérdida de carga permitida. Es esencial

conocer la cantidad de emisores por lateral, calculada multiplicando el número de emisores por árbol por el número de árboles por lateral, y dividiendo esto por el número de laterales por árbol. Con esta información, se puede calcular el factor de salida múltiple (FSM).

Una vez determinada la cantidad de emisores por lateral, se procede a obtener el caudal de cada lateral multiplicando el número de emisores por lateral por el caudal del emisor.

DIMENSIONAMIENTO DEL SECUNDARIO

Para el dimensionamiento del largo máximo del secundario en el sistema de riego, se utilizan diferentes diámetros de tubería (en general desde 63 a 90mm). La máxima pérdida de carga permitida en el secundario se fija en un 5% de la presión de operación del emisor, asegurando así una uniformidad adecuada en el riego.

Para determinar las pérdidas de carga en el secundario, se realiza un proceso iterativo ajustando la longitud del secundario hasta alcanzar la máxima pérdida de carga permitida. Para determinar las pérdidas de carga se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach, al igual que en el caso del dimensionamiento del lateral.

Es esencial conocer la cantidad de laterales por hilera, cifra que se obtiene al multiplicar el número de laterales por salida con el número de salidas. Con la cantidad de laterales se puede calcular el factor de salida múltiple (FSM) mencionado anteriormente. Finalmente se calcula el caudal de cada secundario mediante la multiplicación entre el número de laterales por el caudal del lateral.

AJUSTES DE LA SUBUNIDAD AL ÁREA DEL PREDIO

Al momento de realizar el ajuste de la subunidad al predio, es necesario determinar el número de sectores que se deben regar al día. Para esto hay que considerar tiempo de riego disponible al día y dividirlo en el tiempo de riego por subunidad. Dado que el tiempo de riego disponible al día es de 8 horas, la frecuencia de riego sugerida es de 2 días, para un tiempo de riego de 3.6 horas.

A partir de los requerimientos hídricos del sistema de riego, se estima la energía necesaria para su funcionamiento y se dimensiona el sistema fotovoltaico necesario para alimentar la bomba. Esto puede ser una bomba solar de corriente continua o una bomba convencional con variador de frecuencia de corriente alterna.

Para determinar la energía producida por el arreglo fotovoltaico, se utiliza la plataforma "Explorador Solar" desarrollada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Este proceso implica ingresar las coordenadas geográficas del proyecto (latitud y longitud), así como los parámetros específicos del panel

Crterios de diseo y manejo para microriego con el uso de energa solar

fotovoltaico, el nmero de celdas, voltaje y corriente de operacin, coeficientes de temperatura, inclinacin y direccin del panel. En este caso, se emplearn paneles solares de Canadian Solar modelo CS3W-455Ms de 455 Wp.

La plataforma del explorador solar entrega como resultado la energa generada por un mdulo fotovoltaico durante todos los meses del ao. En este caso, se acota a la temporada de riego (octubre-marzo) y se disea especficamente para el mes de mxima demanda hdrica, en este caso, enero. Estos datos se pueden extrapolar para cualquier cantidad de mdulos.

La Tabla 4 presenta la generacin fotovoltaica (GFv), a lo largo de un da promedio, para los diferentes meses de la temporada de riego.

Tabla 4. Generacin fotovoltaica (GFv) de un panel solar marca Canadian Solar modelo CS3W-455Ms de 455 Wp.

	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
	GFv (KW h ⁻¹)									
Octubre	0,152	0,203	0,245	0,267	0,268	0,246	0,216	0,166	0,095	0,032
Noviembre	0,190	0,251	0,299	0,325	0,328	0,305	0,266	0,204	0,124	0,047
Diciembre	0,190	0,257	0,307	0,333	0,339	0,322	0,289	0,229	0,153	0,071
Enero	0,177	0,250	0,306	0,341	0,353	0,336	0,303	0,248	0,172	0,087
Febrero	0,156	0,231	0,291	0,327	0,342	0,332	0,302	0,244	0,165	0,078
Marzo	0,129	0,200	0,254	0,288	0,298	0,288	0,257	0,202	0,128	0,047

Fuente: Ministerio de Energa, (2022).

DEMANDA Y DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA

Es esencial verificar inicialmente si la energa generada por el sistema fotovoltaico proyectado es suficiente para cubrir el consumo energtico de la electrobomba correspondiente. En el caso de las bombas solares de corriente continua, la potencia requerida por la electrobomba se obtiene directamente de la ficha tcnica proporcionada por el fabricante. Por otro lado, para las bombas convencionales de corriente alterna, se debe determinar el consumo energtico de la electrobomba, que se expresa como la potencia elctrica absorbida, denominada P1.

Esta informacin puede obtenerse de dos maneras: consultando la ficha tcnica del fabricante o calculndola, multiplicando el voltaje por 1,73 por la corriente por el factor de potencia (obtenido de la placa) de la electrobomba en cuestin. Conociendo cmo se logra determinar la potencia elctrica

promedio generada por el sistema, es posible determinar cuántas horas la potencia fotovoltaica generada es igual o mayor a la potencia eléctrica requerida por la electrobomba.

Para sistemas fotovoltaicos que utilizan variadores de frecuencia y electrobombas convencionales, se emplean las leyes de afinidad para bombas centrífugas. Esto permite que una bomba convencional funcione de manera similar a una bomba solar, con velocidades variables dependiendo de la radiación solar en ese momento. Así, su funcionamiento puede variar desde 30 hasta 50 Hz (dependiendo de la bomba), ajustando su presión y caudal de trabajo y manteniendo la estabilidad operativa con la potencia eléctrica suministrada por los paneles fotovoltaicos.

Es crucial determinar las horas diarias de operación en las que cada sistema funciona dentro de los parámetros permitidos por la Comisión Nacional de Riego (CNR) para este tipo de sistemas.

A continuación, desde la Figura 4 hasta la Figura 7 se muestra la generación fotovoltaica para cada configuración con un número específico de paneles solares de la marca Canadian Solar de 455 Wp, en relación con el requerimiento energético de las distintas bombas.

La Figura 4 muestra la relación entre demanda energética de una bomba solar (P1= 0,33 kW) para regar 0,5 hectáreas, bomba de la marca Lorentz modelo PS2-600 CS-F4-3 en función de la generación energética para 2 y 3 paneles solares (PFV 2p y PFV 3p), a lo largo de un día promedio del mes de enero.

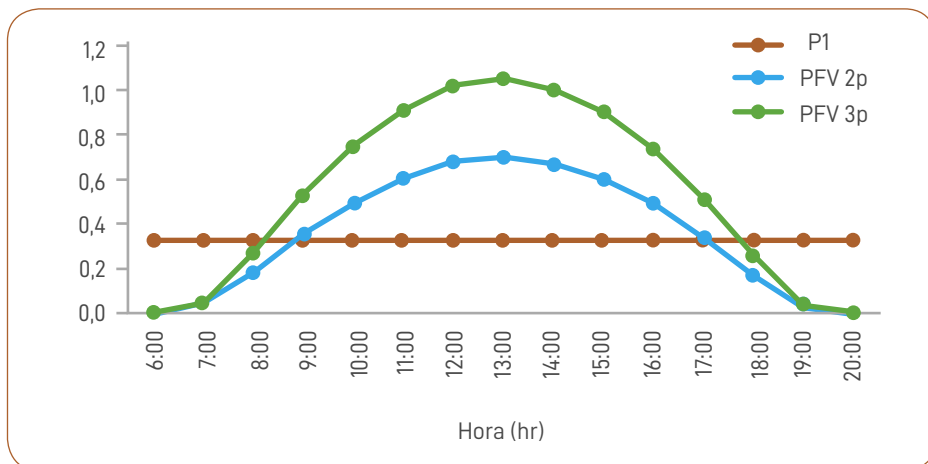


Figura 4. Relación entre potencia fotovoltaica (Potencia) a lo largo de las horas de un día promedio de enero (Hora), predio de 0,5 hectáreas con bomba solar. **Fuente:** elaboración propia.

Crterios de diseo y manejo para microriego con el uso de energa solar

La bomba solar seleccionada de la marca Lorentz modelo PS2-600 CS-F4-3 opera con un caudal $Q=0,7 \text{ L s}^{-1}$, presi3n manom3trica de la bomba $H=19 \text{ m}$, el cual con 2 paneles fotovoltaicos satisface las necesidades de operaci3n del sistema con un caudal y presi3n m3nima $Q_{\text{min}}=0,6 \text{ L s}^{-1}$ y $H_{\text{min}}=18 \text{ m}$, logrando el correcto funcionamiento de este sistema desde las 9 h hasta las 17 h como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Potencia fotovoltaica por 2 paneles (Pot FV), revoluciones (N2), presi3n de la bomba (H), caudal (Q) y frecuencia (f), "0,5 ha, bomba solar".

	0-5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20-23
Pot FV (W)	0	0,3	34	181	354	499	611	682	705	673	606	496	344	174	30	0
N2 (RPM)	-	287	1366	2374	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2342	1307	-
H (m)	-	0,2	4,2	12,7	19	19	19	19	19	19	19	19	19	12,4	3,9	-
Q (L/s)	-	0,1	0,3	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,3	-
Q (m3/h)	-	0,2	1,2	2,1	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,0	1,1	-
f (hz)	-	5	23	41	50	50	50	50	50	50	50	50	50	40	22	-

La Figura 5 muestra la relaci3n entre demanda energ3tica de una bomba convencional con variador de frecuencia ($P1= 0,65 \text{ kW}$) para regar 0,5 hect3reas, bomba de la marca Pentax modelo CMT 50, en funci3n de la generaci3n energ3tica para 3, 4 y 5 paneles solares a lo largo de un d3a promedio del mes de enero.

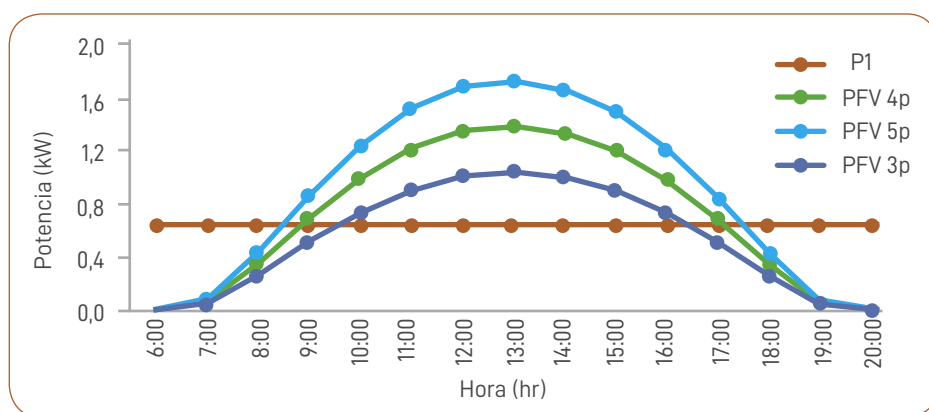


Figura 5. Relaci3n entre potencia fotovoltaica (Potencia) a lo largo de las horas de un d3a promedio de enero (Hora), predio de 0,5 hect3reas con bomba convencional m3s variador de frecuencia. Fuente: elaboraci3n propia.

La bomba seleccionada de la marca Pentax modelo CMT 50 opera con un caudal $Q=0,7 \text{ L s}^{-1}$, presión manométrica de la bomba $H=19 \text{ m}$, el cual con 3 paneles fotovoltaico satisface las necesidades de operación del sistema con un caudal y presión mínima $Q_{\min}=0,6 \text{ L s}^{-1}$ y $H_{\min}=18 \text{ m}$, logrando el correcto funcionamiento de este sistema desde las 10 h hasta las 16 h como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Potencia fotovoltaica por 3 paneles (Pot FV), revoluciones (N2), presión de la bomba (H), caudal (Q) y frecuencia (f), "0,5 ha, variador de frecuencia".

	0-5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20-23
Pot FV (W)	0	0	52	272	530	749	917	1024	1058	1009	910	744	516	261	45	0
N2 (RPM)	-	262	1247	2168	2710	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2685	2138	1194	-
H (m)	-	0,2	3,5	10,6	16,6	19	19	19	19	19	19	19	16,3	10,3	3,2	-
Q (L/s)	-	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,3	-
Q (m3/h)	-	0,2	1,1	1,9	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	1,9	1,0	-
f(hz)	-	5	21	37	47	50	50	50	50	50	50	50	46	37	21	-

La Figura 6 muestra la relación entre demanda energética de una bomba solar ($P_1=1,6 \text{ kW}$) para regar 3 hectáreas, bomba de la marca Samkin modelo N5SP10-4 en función de la generación energética para 8, 9 y 10 paneles solares a lo largo de un día promedio del mes de enero.

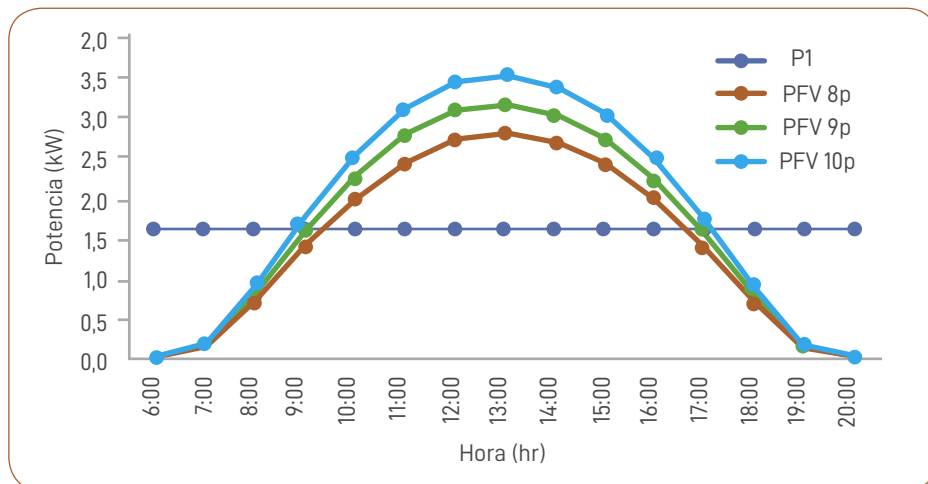


Figura 6. Relación entre potencia fotovoltaica (Potencia) a lo largo de las horas de un día promedio de enero (Hora), predio de 3 hectáreas con bomba solar. Fuente: elaboración propia.

Crterios de diseo y manejo para microriego con el uso de energa solar

La bomba solar seleccionada de la marca Samkin modelo N5SP10-4 opera con un caudal $Q=3,3 \text{ L s}^{-1}$, presi3n manom3trica de la bomba $H=22 \text{ m}$, el cual con 8 paneles fotovoltaicos satisface las necesidades de operaci3n del sistema con un caudal y presi3n m3nima $Q_{\text{min}}=3,3 \text{ L s}^{-1}$ y $H_{\text{min}}=20 \text{ m}$, logrando el correcto funcionamiento de este sistema desde las 10 hrs hasta las 16 hrs como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Potencia fotovoltaica por 8 paneles (Pot FV), revoluciones (N2), presi3n de la bomba (H), caudal (Q) y frecuencia (f), "3 ha, bomba solar".

	0-5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20-23
Pot FV (W)	0	1	138	724	1414	1996	2446	2730	2820	2692	2426	1983	1376	695	121	0
N2 (RPM)	-	269	1281	2227	2783	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2758	2196	1226	-
H (m)	-	0,2	4,3	13,0	20,3	22	22	22	22	22	22	22	19,9	12,6	3,9	-
Q (L/s)	-	0,3	1,5	2,5	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,1	2,5	1,4	-
Q (m3/h)	-	1,1	5,2	9,1	11,4	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	11,3	9,0	5,0	-
f(hz)	-	5	22	38	48	50	50	50	50	50	50	50	47	38	21	-

La Figura 7 muestra la relaci3n entre demanda energ3tica de una bomba convencional con variador de frecuencia ($P1=1,83 \text{ kW}$) para regar 3 hect3reas, bomba de la marca Pedrollo modelo CP 160C en funci3n de la generaci3n energ3tica para 8, 9 y 10 paneles solares a lo largo de un d3a promedio del mes de enero.

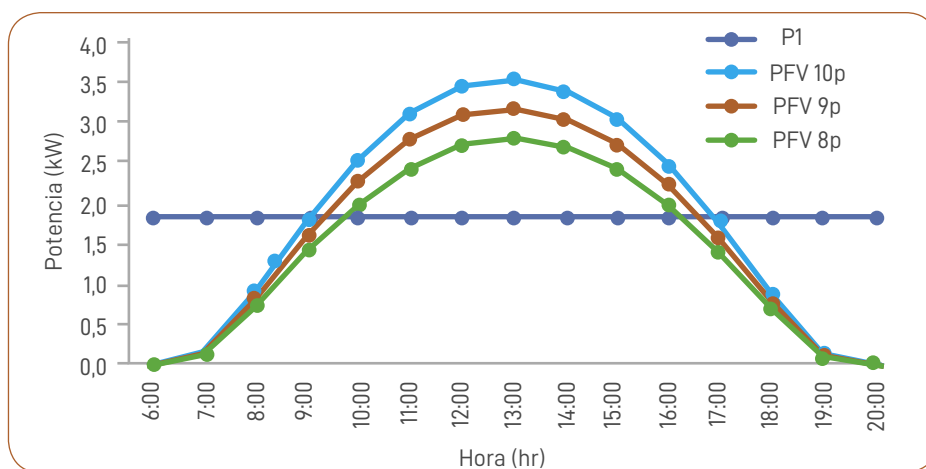


Figura 7. Relaci3n entre potencia fotovoltaica (Potencia) a lo largo de las horas de un d3a promedio de enero (Hora), predio de 3 hect3reas con bomba convencional m3s variador de frecuencia. Fuente: elaboraci3n propia.

La bomba seleccionada de la marca Pedrollo modelo CP 160C opera con un caudal $Q=3,3 \text{ L s}^{-1}$, presión manométrica de la bomba $H=20 \text{ m}$, el cual con 8 paneles fotovoltaicos satisface las necesidades de operación del sistema con un caudal y presión mínima $Q_{\min}=3,3 \text{ L s}^{-1}$ y $H_{\min}=20 \text{ m}$, logrando el correcto funcionamiento de este sistema desde las 10 h hasta las 16 h como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Potencia fotovoltaica por 8 paneles (Pot FV), revoluciones (N2), presión de la bomba (H), caudal (Q) y frecuencia (f), "3 ha, variador de frecuencia".

	0-5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20-23
Pot FV (W)	0	1	138	724	1414	1996	2446	2730	2820	2692	2426	1983	1376	695	121	0
N2 (RPM)	-	258	1225	2129	2661	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2900	2637	2100	1173	-
H (m)	-	0,2	3,6	10,8	16,8	22	22	22	22	22	22	22	16,5	10,5	3,3	-
Q (L/s)	-	0,3	1,4	2,4	3,0	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,0	2,4	1,3	-
Q (m3/h)	-	1,1	5,0	8,7	10,9	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	10,8	8,6	4,8	-
f(hz)	-	4	21	37	46	50	50	50	50	50	50	50	45	36	20	-

Es crucial establecer una correlación entre las horas totales de riego por día y si estas coinciden con las horas de generación diaria de energía solar en los distintos meses de la temporada de riego, como se muestra en la Tabla 9.

Crterios de diseo y manejo para microriego con el uso de energa solar

Tabla 9. Evapotranspiracin de referencia diaria (ETPd), evapotranspiracin de referencia mensual (ETPm), factores de cobertura (F1 y F2), evapotranspiracin del cultivo (Etc), frecuencia de riego (Fr), horas de riego por sector (Hr), horas de riego total diaria (HrT), horas de generacin diarias (Hgd), ya sea para bomba solar (Bs) como bomba convencional con variador de frecuencia (Vf) para 0.5 y 3 hectreas a lo largo de la temporada de riego.

	ETPd (mm/ da)	ETPm (mm/ mes)	F1	F2	Etc (mm/ da)	Fr (da)	Hr (h)	HrT (h)	0.5 ha		3 ha	
									Bs	Vf	Bs	Vf
Octubre	4.49	139.1	1.02	0.1	2.78	4	1.9	4	7	4	6	4
Noviembre	4.53	136.0	1.02	0.1	3.04	4	2.1	4	8	6	7	6
Diciembre	4.84	149.9	1.02	0.1	3.49	3	2.4	5	8	7	7	7
Enero	7.25	224.7	1.02	0.1	5.23	2	3.6	7	8	7	7	7
Febrero	6.30	170.2	0.6	0.1	2.96	4	2.1	4	7	7	7	7
Marzo	4.65	144.3	0.6	0.1	2.19	5	1.5	3	7	5	7	5

La Tabla 9 representa la cantidad de horas al da que nuestro sistema de riego necesita para cumplir con el total de la demanda hdrica en dos sectores de riego al da, para los diferentes tamaos de predio de (0,5 y 3 hectreas), cumpliendo en todos los casos con el total de energa requerida por las bombas para los diferentes sectores de riego.

VARIABILIDAD DE COSTOS Y PRODUCCIÓN

COSTOS FIJOS ANUALIZADOS

Los costos fijos dependen de distintas variables como: la vida útil del proyecto, la tasa de interés, costos de las bombas, paneles, tuberías, cables, estructuras y los costos de instalación para estos sistemas.

Con esto se determina el costo fijo de cada proyecto, a partir de la suma de los costos de los paneles, bomba, tuberías, estructura, cables e instalación (C_{p+B+Tb}) y este valor lo multiplicamos con el factor de recuperación del capital (FRC) obteniendo los costos fijos anualizados ($CF A$) de cada proyecto fotovoltaico. Luego podemos obtener los costos anuales totales (CAT) con la suma de los costos fijos anuales ($CF A$) más la mantención anual (MA) de cada proyecto.

COSTOS DEL KILOWATT HORA

Para obtener el costo del kilowatt hora ($P kWh$) es necesario calcular el costo total de cada arreglo fotovoltaico (CT). Para esto, se multiplica el precio por panel (PP) por el número total de paneles (NP) y se suma el precio del variador de frecuencia (PVf). Además, se añade el costo de instalación (CI) y se suman los costos asociados con las estructuras y los cables (CE+C). En resumen, el costo total (CT) es la suma de todos estos elementos, representando así el gasto total requerido para implementar el sistema fotovoltaico, incluyendo componentes y costos de instalación.

De igual manera se necesita calcular los costos fijos anuales de cada proyecto ($CF A_E$), multiplicando los costos totales (CT) por el factor de recuperación del capital (FRC), también necesitamos calcular los costos anuales totales de cada proyecto (CA TE) sumando los costos fijos anuales ($CF A_E$), más la mantención anual de cada proyecto (MA).

Para calcular el precio por kilovatio-hora (kWh) de energía eléctrica generado por un sistema de paneles solares, primero se hace la sumatoria de la generación energética fotovoltaica mensual para todos los meses de la temporada de riego (GFv Tr), que abarca de octubre a marzo. Luego, se divide el costo anual total de la energía (CA TE) entre esta sumatoria multiplicada por el número de paneles fotovoltaicos (NP). Esto proporciona un indicador del costo por unidad de energía producida por el sistema de paneles solares durante la temporada de riego, lo que permite evaluar la rentabilidad y eficiencia económica de la instalación en relación con la generación de energía durante ese período específico. Estos resultados se presentan en la Tabla 10.

Crterios de diseo y manejo para microriego con el uso de energa solar

Tabla 10. Tamao del predio (TDP), tipo de bomba (T B), nmero de paneles (N P), precio unitario del panel (P uni), precio variador de frecuencia (P Vf), costo paneles (C P), costo instalacin (C I), costos estructuras ms cables (C E+C), costos totales (C T), costos fijos anualizados (CF AE), mantenimiento anual (M A), costos anuales totales (CA T_E), generacin energtica (G E) y precio del kilo Watt hora (P Kw/h).

TDP (ha)	T B	N P	P uni (\$)	P Vf (\$)	C P (\$)	C I (\$)	C E+C (\$)	C T (\$)	CF AE (\$)	M A (\$)	CA T _E (\$)	G E (kw/h)	P kW/h (\$)
0,5	Bs	2	262541	-	525082	183779	173409	882270	89861	32000	121861	600	203
	Vf	3	262541	370089	787623	275668	334716	1768096	180084	32000	212084	900	236
3	Bs	8	262541	-	2100328	735115	1101239	3936682	400960	64000	464960	2400	194
	Vf	8	262541	437127	2100328	735115	1137546	4410116	449180	64000	513180	2400	214

De la Tabla 10, se observa que la alternativa ms rentable econmicamente es el uso de una bomba solar. Esto se debe a que requiere un menor nmero de paneles, estructuras ms pequeas, y un menor nmero de cables, as como costos de instalacin y mantenimiento ms bajos. Estos factores se traducen en un costo total de energa menor, obteniendo un precio por kilovatio hora de \$33 para un predio de 0,5 hectreas y de \$20 para un predio de tres hectreas, en comparacin con la alternativa de una bomba convencional con variador de frecuencia.

COSTOS TOTALES ARREGLO FOTOVOLTAICO

En la tabla 11 se muestran los costos totales de los arreglos fotovoltaicos para ambas alternativas de bombeo y tamao del predio.

Tabla 11. Tamaño del predio (TDP), tipo de bomba (T B), número de paneles (N P), precio unitario del panel (P uni), precio variador de frecuencia (P Vf), costo paneles (C P), precio cables (P C), precio estructuras (P E), costos instalación (C I), costo total "paneles, cables, estructuras, instalación" (CP+C+E+I).

TDP (ha)	T B	N P	P uni (\$)	P Vf (\$)	C P (\$)	P C (\$)	P E (\$)	C I (\$)	C _{P+C+E+I} (\$)
0,5	Bs	2	262.541	-	525.082	48.409	125.000	183.779	882.270
	Vf	3	262.541	370.089	787.623	84.716	250.000	275.668	1.768.096
3	Bs	8	262.541	-	2.100.328	651.239	450.000	735.115	3.936.682
	Vf	8	262.541	437.127	2.100.328	687.546	450.000	735.115	4.410.116

De la Tabla 11 se observa que los costos totales, que incluyen paneles fotovoltaicos, cables, estructuras e instalación, son menores para los sistemas de bomba solar en comparación con las bombas convencionales con variador de frecuencia. Para un predio de 0,5 hectáreas, el costo total de una bomba solar con 2 paneles es de \$882.270, mientras que el costo total de una bomba con variador de frecuencia con 3 paneles es de \$1.768.096, una diferencia de \$885.826. Para un predio de 3 hectáreas, el costo total de una bomba solar con 8 paneles es de \$3.936.682, mientras que el costo total de una bomba con variador de frecuencia con 8 paneles es de \$4.410.116, una diferencia de \$473.434.

COSTO ANUAL POR HECTÁREA

En la Tabla 12 se describen los costos por hectárea para ambas alternativas de bombeo y tamaño del predio.

Tabla 12. Tamaño del predio (TDP), tipo de bomba (T B), costo total “paneles, cables, estructuras, instalación” ($C_{P+C+E+I}$), precio bomba (P B), instalación bomba (I B), costo bomba más instalación (C_{B+I}), costo total paneles más bombas más instalación (C_{P+B+I}), cotos tuberías (C Tb), costos paneles más bomba más tuberías (C_{P+B+Tb}), costos fijos anualizados (CF A), costos anuales totales (CA T) y costo anual por hectárea (CA Ha).

TDP (ha)	T B	$C_{P+C+E+I}$ (\$)	P B (\$)	I B (\$)	C_{B+I} (\$)	C_{P+B+I} (\$)	C Tb (\$)	C_{P+B+Tb} (\$)	CF A (\$)	CA T (\$)	CA Ha (\$)
0,5	Bs	882.270	1.511.106	151.111	1.662.217	2.544.487	807.690	3.352.177	341.427	373.427	746.853
	Vf	1.768.096	231.086	23.109	254.195	2.022.291	807.690	2.829.981	288.240	320.240	640.480
3	Bs	3.936.682	1.299.000	129.900	1.428.900	5.365.582	4.798.895	10.164.477	1.035.274	1.099.274	366.425
	Vf	4.410.116	583.100	58.310	641.410	5.051.526	4.798.895	9.850.421	1.003.287	1.067.287	355.762

Al analizar los datos de la Tabla 12 para predios de 0,5 y 3 hectáreas, se observa que la opción más económica en ambos casos es la implementación de un sistema con bomba convencional junto con un variador de frecuencia. Esto se debe a la notable disparidad en los costos entre la bomba solar y la bomba convencional, así como a los gastos de instalación asociados.

CONSIDERACIONES FINALES

- Mediante la utilización de parámetros tanto físicos como medioambientales se determinaron las relaciones entre demanda hídrica y disponibilidad de energía, los cuales requieren datos históricos de evapotranspiración de referencia de estaciones meteorológicas, al igual que de generación de energía proporcionados por la plataforma "Explorador Solar" del Ministerio de Energía. Con ello, se establecieron las horas disponibles donde los diferentes sistemas cumplen con el requerimiento tanto hídrico como energético para las bombas solares o las bombas convencionales con variador de frecuencia.
- Un criterio fundamental al diseñar sistemas de riego con energía solar es considerar la disponibilidad específica de horas de energía durante el período de máxima demanda. En general, existen entre 7 a 8 horas al día para regar, por lo que el diseño de riego debe operar acorde a las horas de disponibilidad energética durante ese periodo.
- La opción de utilizar una bomba solar resulta más rentable desde una perspectiva energética debido al menor costos del kilowatt hora. Esto se debe a que no se requiere otro componente adicional denominado inversor variador de frecuencia.
- Para predios de 0.5 y 3 hectáreas, la alternativa más económica en términos de costos anuales por hectárea es el uso de bombas convencionales con variador de frecuencia. Esto se debe a que la diferencia entre una bomba solar y una bomba convencional es muy alta y no logra competir con el bajo valor de inversión inicial. La diferencia significativa en los costos entre los equipos de bombas solares y los convencionales conlleva a menores gastos de mantenimiento e instalación de la bomba.
- Aunque los costos del kilowatt hora y los costos asociados al arreglo fotovoltaico son más bajos en el caso de la bomba solar, no logran compensar su inversión inicial más alta. Esta diferencia sustancial en los costos entre la bomba solar y la convencional supone un desafío significativo, ya que la inversión inicial más elevada de la bomba solar no puede ser contrarrestada por los ahorros en costos operativos a lo largo del tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agrometeorología. 2021. Ninhue [en línea: programa computacional]. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Chile. Disponible en: <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/#>
- Barrueto, A., R. Barraza, J.A. Ardila-Rey, E. Núñez, A. González and G. Arancibia. 2018. A cost-effective methodology for sizing solar PV systems for existing irrigation facilities in Chile [en línea]. *Energies* 11(7): 1853(Art. No.). Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1853>
- CNR. 2018. Manual de inspección y revisión de sistemas fotovoltaicos. Comisión nacional de Riego P.146. Santiago Chile.
- Cooper, M. 2012. Energías renovables no convencionales en la agricultura. ODEPA, Chile. Disponible en: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2012/07/6587_ArtEneRenov072012.pdf
- Fereres, E., Pruitt, W. O., Beutel, J. A., Henderson, D. W., Holzapfel, E., Shulbach, H., & Uriu, K. 1981. ET and drip irrigation scheduling. *Drip irrigation management*, 21259, 8-13.
- Holzapfel, E., D. Rivera y J.L. Arumí. 2020. Manejo de agua y contaminación. pp: 20-47. En: Tecnología del manejo de agua para una agricultura intensiva sustentable. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- INE (Chile). 2007. Cambios estructurales en la agricultura chilena. Análisis intercensal 1976 – 1997 – 2007 [en línea]. INE, Chile. Disponible en: https://www.ine.cl/docs/default-source/censo-agropecuario/publicaciones-y-anuarios/2007/cambios-estructurales-en-la-agricultura-chilena---analisis-intercensal-1976-1997-2007.pdf?sfvrsn=9dfd0a74_7
- Karmeli, D., G. Peri and M. Todes. 1985. Selection of emitters pp: 20-42. In: *Irrigation systems: desing and operation*. Oxford University Press. Cape Town, South Africa.
- López-Luque, R., J. Reca and J. Martínez. 2015. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Appl. Energy* 149: 13-23.
- López-Olivarí, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile. Conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Boletín INIA N°340. INIA Carillanca. Temuco, Chile.
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M Ribas-Carbó y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* (43): 63-84.
- Mérida, G., I. Fernández, E. Camacho, P. Montesinos and J.A. Rodríguez. 2018. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J. Clean. Prod* 175: 670-682.
- Ministerio de Energía. 2022. Explorador solar [en línea: programa computacional]. Ministerio de Energía, Chile. Disponible en: <https://solar.minenergia.cl/exploracion>



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HIDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERIA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

CARTILLAS TÉCNICAS CRHIAM 2024



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo
Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación
• Mincyt
Gobierno de Chile