

Evaluación del rendimiento de dos sistemas de bombeo solar, con tres alturas de descarga

Luis Pedro Ávila Godoy
Oscar Manuel Suchini Osorio

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2015

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Evaluación del rendimiento de dos sistemas de bombeo solar, con tres alturas de descarga

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado
Académico de Licenciatura

Presentado por

Luis Pedro Ávila Godoy
Oscar Manuel Suchini Osorio

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2015

Evaluación del rendimiento de dos sistemas de bombeo solar, con tres alturas de descarga

Presentado por:

Luis Pedro Ávila Godoy
Oscar Manuel Suchini Osorio

Aprobado:

Francisco Álvarez, M.A.E.
Asesor Principal

John Jairo Hincapié, Ph.D.
Director
Departamento de Ciencia y
Producción Agropecuaria

Dafne Serrano, Ing.
Asesor

Raúl H. Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Raúl Espinal, Ph.D.
Asesor

Evaluación del rendimiento de dos sistemas de bombeo solar, con tres alturas de descarga

**Luis Pedro Avila Godoy
Oscar Manuel Suchini Osorio**

Resumen. El cambio climático y la baja disponibilidad de agua para los agricultores son problemas que se deben afrontar con tecnologías limpias y eficientes. El uso de energía solar es una solución. Los sistemas de bombeo solar utilizan energía fotovoltaica para bombear agua y direccionarla a un sistema de riego o reservorios para almacenamiento. Los objetivos fueron determinar el caudal instantáneo promedio (L/h) de dos sistemas de bombeo solar con tres alturas de descarga y determinar modelos de regresión lineal que expliquen el efecto de la radiación solar (W/m^2) sobre el caudal para cada uno de los tratamientos. Con los modelos de regresión se elaboró un cuadro que indica los caudales promedio potenciales según rangos de radiación solar, con el propósito de estimar el volumen bombeado diariamente. Se utilizó un diseño completo al azar con arreglo factorial. Se evaluaron las bombas solares ennos gmbh® de 120W. Existen seis tratamientos, compuestos del sistema de bombeo y alturas de descarga. Los sistemas de bombeo solar se diferencian por el panel solar que usan. Los paneles solares son de 110W o 120W, y las alturas de descarga a dos, cuatro y seis metros. Se tomaron datos diarios de radiación solar y caudal de enero a abril 2015. Los tratamientos pertenecientes al sistema 110P (panel solar de 110W) tuvieron una media de caudal mayor que aquellos que pertenecían al 120P (panel solar de 120W) ($P < 0.05$). Existe una correlación positiva entre las variables radiación solar y caudal instantánea dada por los coeficientes de correlación Pearson. Se determinaron los modelos de regresión lineal que explican el efecto de la variable radiación solar sobre caudal instantáneo para cada tratamiento ($P < 0.05$). Con los modelos de regresión se determinó el caudal instantáneo potencial y el volumen diario bombeado según las condiciones climáticas Zamorano para 2014 y según rangos de radiación solar de 200 a 1,299 W/m^2 .

Palabras claves. Bomba solar, energía fotovoltaica, iDE.

Abstract. Climate change and the lack of water for small farmers represent some of the greatest problems in the world. The solution for this situation is the use of efficient and environmentally friendly technologies. The use of solar power in solar pumps is a solution. Solar pumps can be used to fill up reservoirs or be used directly for irrigation. The objectives were to determine which of the two solar pumping systems were more efficient at different heights, which were two, four and six meters. The output was measured in terms of average flow rate (L/h). With solar radiation and flow rate data, lineal regression models were determined to predict the effect of solar radiation (W/m^2) over flow rate for each treatment. Charts were elaborated based on the regression models. These charts indicated the average flow rate we can obtain with each treatment depending on different ranges of solar radiation, and lately, predict the average volume obtained. The experiment was a completely randomized design with two factors. Ennos gmbh® solar pumps were evaluated. Treatments were arranged by two factors which were two kinds of systems (110P and 120P): one using a 110W solar panel and one with 120W solar panel. The other factor was discharge height at two, four and six meters. Data was measured during the first four months of 2015 at Zamorano. Treatments using solar panel of 110W had a higher water flow output than the ones with 120W. The treatments with the highest output were the ones using 110P system ($P<0.05$). There exists a positive correlation between flow rate and solar radiation variables. This was determined by using Pearson correlation coefficients. The linear regression models were determined to estimate flow rate ($P<0.05$). Using the regression models, average flow rates were estimated for each treatment. Models were also used to estimate daily volumes based on Zamorano weather data of 2014.

Key Words. iDE, photovoltaic energy, solar pumps.

CONTENIDO

	Portadilla.....	i
	Página de firmas.....	ii
	Resumen.....	iii
	Contenido.....	v
	Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	vi
1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
4	CONCLUSIONES.....	27
5	RECOMENDACIONES.....	28
6	LITERATURA CITADA.....	29
7	ANEXOS.....	31

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Variables climáticas de enero a abril, para 2010 a 2015 de la estación climatológica de la E.A.P. Zamorano, Honduras.....	3
2. Tratamientos y sus componentes.....	5
3. Materiales para cada uno de los sistemas de bombeo.....	6
4. Materiales para las alturas de descarga	6
5. Paneles solares utilizados para el experimento.	8
6. Caudales promedios instantáneos y correlaciones entre caudal instantáneo y radiación solar.	12
7. Modelos de regresión para cada tratamiento.....	17
8. Caudales potenciales promedio según rangos de radiación solar.....	19
9. Caudales estimados basados en datos de radiación solar de Zamorano, 2014.....	21
10. Volumen promedio diario y acumulado mensual según la radiación solar de Zamorano para 2014.....	26
Figuras	
	Página
1. Componentes de los dos sistemas de bombeo solar.....	4
2. Alturas de descarga a dos, cuatro y seis metros en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS) en Zamorano.....	4
3. Diseño de las tuberías dentro de la instalación	7
4. Sistemas de bombeo y paneles solares ubicados en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS) en Zamorano.....	8
5. Diagrama de los sistemas de bombeo solar.	9
6. División del panel solar sombreado y soleado.....	10
7. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 2 m.....	14
8. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 4 m.....	14
9. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 6 m.....	15
10. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 2 m.....	15
11. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 4 m.....	16
12. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 6 m.....	16
13. Modelos de regresión lineal para los seis tratamientos.....	18

Anexos	Página
1. Estudios realizados con sistemas de bombeo ennos gmbh® con potencias constantes.....	31

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito agrícola, la energía es un recurso indispensable para cualquier actividad o proceso productivo y existen diversas alternativas para adquirirla (Ray 1981). El cambio climático es una realidad y el sector agropecuario debe buscar fuentes energéticas que sean eficientes y amigables con el ambiente (Pittock 2005). Los combustibles fósiles han sido los más utilizados en labores de la agricultura. Sin embargo la dependencia de estos es preocupante en el sector agropecuario. Las oscilaciones de los precios de los combustibles y su escasez, provocan un gran impacto en cubrir la demanda de alimentos. De esta problemática, surge el reto de utilizar tecnologías inteligentes, baratas y amigables con el ambiente, que al mismo tiempo desliguen la dependencia que existe en la agricultura de los combustibles (FAO 2015).

Muchos agricultores han optado por producir energía renovable en sus mismas fincas, a modo de suplir completa o parcialmente su demanda energética. De 2008 a 2011, el número de fincas en E.E.U.U. que producían su energía renovable creció un 99%. La energía fotovoltaica representó un 93% del total de sistemas para la producción de energía renovable (Beckman *et al.* 2013). La demanda de paneles solares ha incrementado en todo el mundo, como en Europa, con un incremento del 169% en los últimos diez años (IHS 2015).

La energía fotovoltaica ha evolucionado en la última década. Ésta funciona por medio de paneles solares, los cuales contienen celdas que tienen un dispositivo semiconductor. Este dispositivo recibe radiación y excita los electrones del mismo. Se crea un diferencial de potencia, y es almacenada en una batería o utilizada de inmediato (APPA 2009). Sus usos varían y pueden ser utilizados en diversas actividades agrícolas.

La producción de vegetales es una de las actividades de subsistencia para pequeños agricultores. Se estima que el 70% de la gente de escasos recursos en el mundo son agricultores de pequeña escala. Las dificultades que afrontan muchos de ellos para la producción en campo, son la disponibilidad de agua, así como la energía para abastecerla. International Development Enterprises (iDE) es una organización que se encarga de ayudar a estas personas en varios países, proporcionándoles tecnologías de riego y almacenamiento de agua. Tener suficiente agua disponible para usos productivos se ve reflejado en el incremento de la producción de alimentos, y por lo tanto ingresos para los

productores. Esta entidad busca los lugares donde usar estas tecnologías sea factible y tenga efectos positivos (iDE 2015).

En 2012, iDE y Zamorano crean el Centro para la Producción e Innovación Rural Sostenible (CEPiRS), del cual está a cargo la unidad de Maquinaria y Riego del Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria (DCPA). El CEPiRS evalúa y crea soluciones para el uso eficiente de los recursos hídricos a bajo costo, en lo que respecta al riego de cultivos, bombeo de agua y su almacenamiento. Cuenta con tecnologías de riego por goteo, microaspersión, bombas solares, entre otros. El centro está a disposición de los estudiantes de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (EAP), así como para charlas informativas y talleres realizados para agricultores externos (Almeida y Elvir 2014).

En 2011 y 2012, iDE y Caritas Suiza, la Agencia Suiza para el Desarrollo, Cooperativa SDC, y ennos gmbH®, distribuyeron 200 sistemas de bombeo solar alrededor del mundo para ser evaluados. Actualmente 18 de estos sistemas se encuentran en la E.A.P.

Las funciones principales de estos sistemas, son almacenar agua en reservorios para uso agrícola o doméstico. Se pueden utilizar directamente para riego. Para nuestra región, existen dos ideas en las cuales se basa el desarrollo de estos sistemas: reducir el costo de inversión en paneles solares, e incrementar la eficiencia con el propósito de mejorar el nivel de vida del agricultor (Vezzini 2011).

Las bombas solares funcionan con un motor eléctrico, el cual va acoplado a la misma bomba. La energía fotovoltaica es captada por los paneles y llega a un controlador solar en el componente electrónico de la bomba, la cual es acondicionada de acuerdo al motor (Thomas 1996). El bombeo de está relacionado a la radiación solar, la altura de descarga y la misma configuración de los paneles solares (Lisei 2012). Las condiciones climáticas influyen sobre los sistemas fotovoltaicos, y estas mismas pueden variar. Actualmente, existen estudios que demuestran el desempeño de estos sistemas de bombeo bajo condiciones controladas. Sin embargo, no hay información sobre su rendimiento en condiciones de campo.

El primer objetivo del estudio fue determinar el caudal instantáneo promedio de dos sistemas de bombeo a tres alturas de descarga. El segundo objetivo fue determinar los modelos de regresión lineal que correlacionen caudal y radiación solar. Con los modelos de regresión lineal se pretende elaborar una guía que sirva para estimar el caudal potencial promedio y el volumen de agua potencial bombeado, para diversos usos, según la radiación solar de la zona de interés.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue llevada a cabo en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS) de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, en San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras.

En el Cuadro 1, se muestran los promedios diarios mensuales de las principales variables climáticas en la región de Zamorano, de enero a abril, para 2010 a 2015:

Cuadro 1. Variables climáticas de enero a abril, para 2010 a 2015 de la estación climatológica de la E.A.P. Zamorano, Honduras.

Meses	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Radiación solar (W/m ²)	Horas luz	Precipitación (mm)
Enero	23.2	65.7	353.1	11.4	13.1
Febrero	24.4	59.6	424.2	11.7	6.2
Marzo	26.1	53.4	470.5	12.1	9.6
Abril	27.8	53.5	482.1	12.4	48.8

Datos climatológicos de Zamorano, de 6:00a.m. – 5:00p.m.

Datos obtenidos de la estación climatológica Davis Vantage Pro 2 Plus.

El diseño experimental es un diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial. Se realizó un procedimiento GLM, una separación de medias LSMEANS, y estimación del coeficiente de correlación Pearson entre variables. Para determinar los modelos de regresión lineal se usó el procedimiento PROC REG. El nivel de probabilidad exigido fue de $P \leq 0.05$. El análisis estadístico se realizó con el programa “Statistical Analysis System” SAS[®] versión 9.3.

El estudio constó de seis tratamientos. Los tratamientos fueron conformados por dos sistemas de bombeo y tres alturas de descarga.

Los sistemas de bombeo solar estaban conformados por un panel solar, un convertidor fotovoltaico, un motor eléctrico ennos gmbh[®] Brushless, y una bomba de paletas. Los dos sistemas de bombeo se diferencian únicamente por el panel solar. Para este estudio, los dos sistemas de bombeo fueron: 110P, el cual tiene un panel solar de 110W tipo

monocristalino y el sistema 120P, con un panel de 120W tipo policristalino. En la Figura 1, se puede observar la composición de los dos sistemas de bombeo solar.

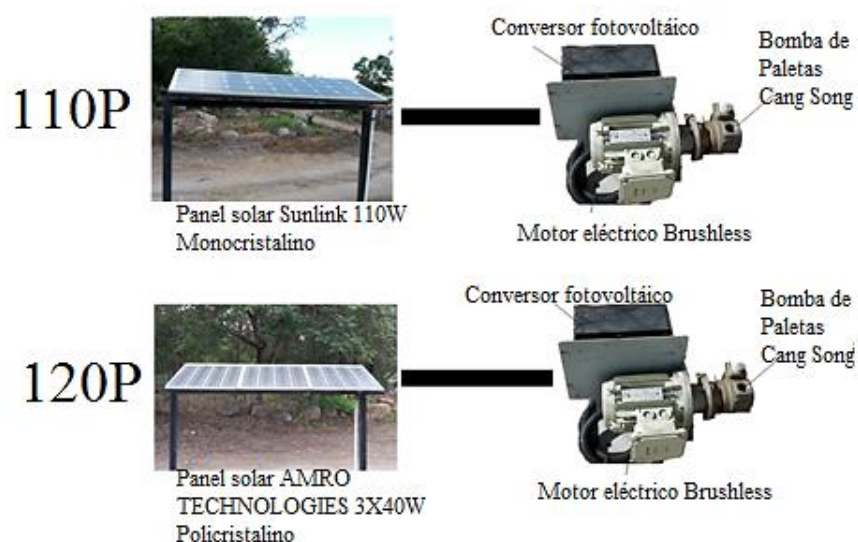


Figura 1. Componentes de los dos sistemas de bombeo solar.

Los sistemas de bombeo estaban conectados por medio de tuberías a tres alturas de descarga. Para la succión, se utilizó una manguera flexible de 25 mm de diámetro; polietileno; con una longitud de dos metros. Para la tubería de descarga, utilizó tubería de 25 mm de diámetro; PVC; SDR 26; con una longitud de seis, ocho y diez metros para las descargas a de dos, cuatro y seis metros, respectivamente. La Figura 2 muestra las tres alturas de descarga de agua.



Figura 2. Alturas de descarga de agua dos, cuatro y seis metros en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS) en Zamorano.

Como fue mencionado anteriormente, los dos factores que influyen en nuestro estudio, son las tres alturas de descarga y los dos sistemas de bombeo. Es decir, tenemos seis tratamientos. En el Cuadro 2 podemos ver los componentes de los tratamientos:

Cuadro 2. Tratamientos y sus componentes.

Tratamiento	Motor eléctrico ^γ (W)	Panel solar (W)	Tipo de celda solar ^β	Altura de descarga (m)
110P-2	120	110	M	2
110P-4	120	110	M	4
110P-6	120	110	M	6
120P-2	120	120	P	2
120P-4	120	120	P	4
120P-6	120	120	P	6

^γEl motor eléctrico, convertidor y bomba tienen una altura estática de succión de 1.5m.

^βM: Celda solar tipo monocristalino. P: celda solar tipo policristalino.

Se utilizaron cuatro bombas solares fabricadas por ennos gmbh®. Cada una de las bombas estaba conectada a dos tuberías: una tubería de retorno a la fuente original, y otra que lleva el agua a la tubería que conduce a los dos, cuatro y seis metros de altura. Todas las bombas estaban conectadas a la misma tubería de descarga.

Dos bombas estaban conectadas a tres paneles de 40W cada una, sumando así 120W de potencia. Las otras dos estaban conectadas a un panel de 110W cada una. Por lo tanto, dos bombas formaron parte del sistema de 120P, y las otras dos del sistema de 110P. Ambos sistemas comparten las tres alturas de descarga, las cuales por medio de válvulas, fueron aforadas independientemente.

Todas las bombas tenían una manguera de succión y distribuían el agua por medio de tuberías. La tubería que direcciona el agua a las tres alturas de descarga se ubicó en el centro de toda la instalación de bombas. Las tuberías individuales de cada bomba se conectaron a esta tubería. En el Cuadro 3 y 4 se encuentran los materiales para cada sistema de bombeo con su retorno y para las alturas de descarga.

Cuadro 3. Materiales para cada uno de los sistemas de bombeo.

Material	Medida	Unidad	Cantidad
Motor eléctrico ennos gmbh ®	½	HP	1
Bomba de paletas Cang Song	-	-	1
Convertor fotovoltaico ennos gmbh ®	-	-	1
Válvula de pie	25	mm	1
Rosca universal	25	mm	1
Adaptadores flex	25	mm	2
Adaptador hembra PVC	25	mm	1
Codo PVC	25	mm	4
Tee de PVC	25	mm	3
Adaptador macho PVC	25	mm	3
Tapón hembra PVC	25	mm	1
Reductor PVC	25-19	mm	1
Camisa	19	mm	2
Reductores PVC	19-13	mm	2
Adaptador macho PVC	13	mm	2
Unión universal lisa PVC	25	mm	1
Válvulas de bola	25	mm	2
Tubo SDR 26, PVC	25	mm	10
Filtros de malla	-	-	4

Cuadro 4. Materiales para las alturas de descarga.

Material	Diámetro	Unidad	Cantidad
Tee PVC	25	mm	1
Válvulas de bola	25	mm	4
Codo PVC	25	mm	10
Tapón PVC	25	mm	1
Tubo SDR 26, PVC	25	mm	23 m

Toda la tubería fue PVC y el diámetro de los tubos fue de 25mm. En la Figura 3 se muestra el diseño de las tuberías en la instalación.

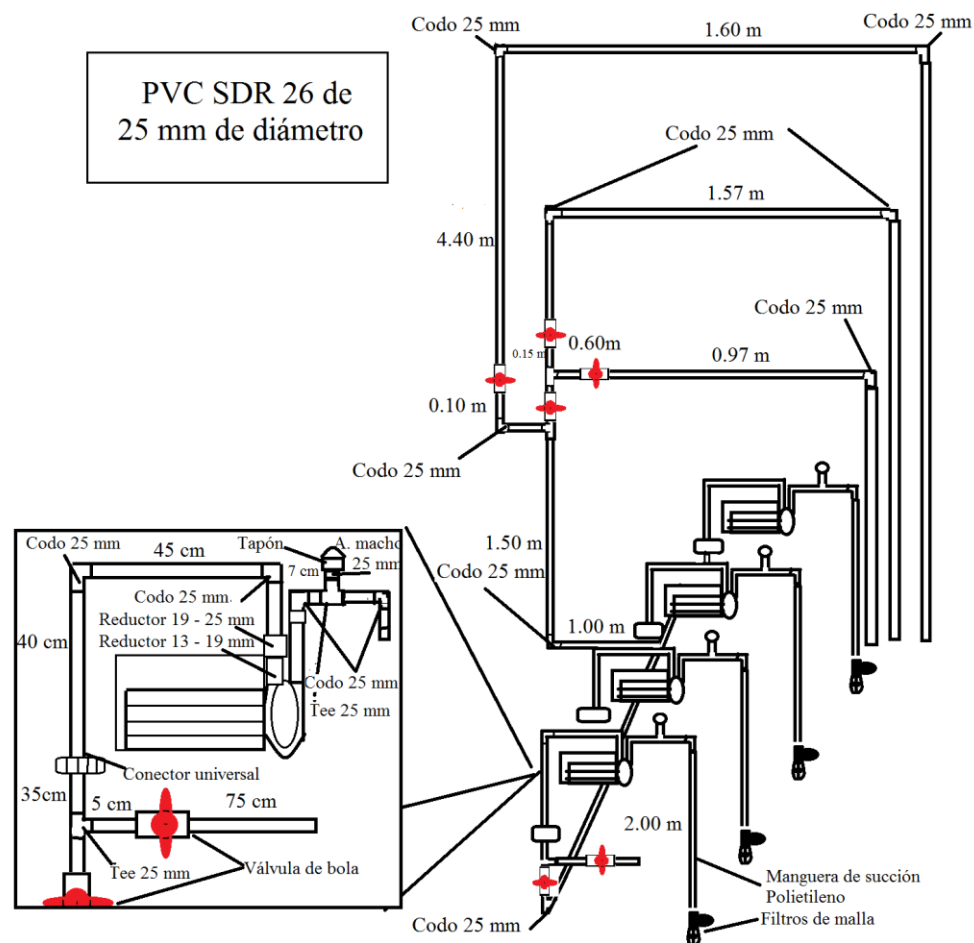


Figura 3. Diseño de las tuberías dentro de la instalación.

Para cada sistema de bombeo, se tuvo una válvula de bola que retorna el agua a la fuente o la direcciona hacia cualquiera de las tres alturas de descarga, las cuales son manejadas de la misma manera con válvulas de bola.

Para el estudio, se evaluaron dos tipos de paneles solares: 110W y 120W de potencia. Los paneles de 120W estaban conformados por tres paneles solares de 40W, sumando así 120W. El cableado utilizado para conectar los paneles solares a cada convertidor eléctrico, fue de cobre AWG 8. En el Cuadro 5 se pueden observar las características de los paneles solares que se utilizaron en el estudio para cada sistema de bombeo.

Cuadro 5. Paneles solares utilizados para el experimento.

Material	Dimensión (cm)	Potencia (W)	Voltaje (V) [∞]	Tipo de celda	Cantidad
Panel AT-240 AMRO T.	66x46	40	16.4	Policristalino	3
Panel SL110-12N Sunlink	110x65	110	16.8	Monocristalino	1

[∞]Voltaje según la ficha técnica de cada panel con 1000W/m² y temperatura de la celda a 25°C.

En la Figura 4, se puede observar los cuatro paneles solares alineados en CEPiRS. Estos se encuentran intercalados, primero 110W y luego 120W de izquierda a derecha. También se puede observar cómo estaban posicionados los sistemas de bombeo.



Figura 4. Sistemas de bombeo y paneles solares ubicados en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS) en Zamorano.

En la Figura 5 se presenta el diagrama de la instalación de los paneles solares y los sistemas de bombeo.

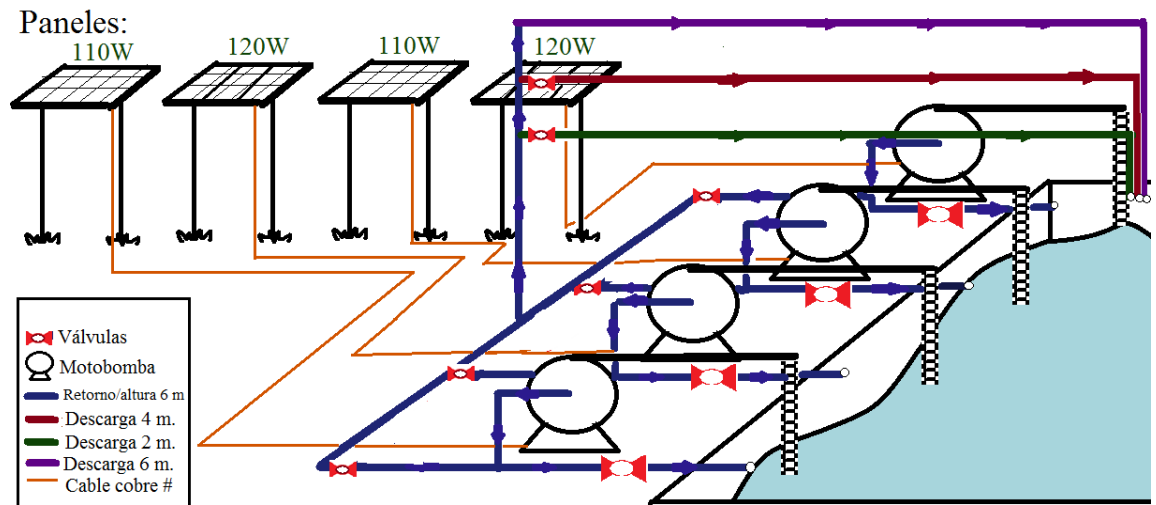


Figura 5. Diagrama de los sistemas de bombeo solar.

Se tomaron datos de los caudales producidos y de la radiación solar durante 10 segundos. Estas mediciones se hicieron simultáneamente.

Para medir la radiación solar se utilizó un piranómetro, el cual brindó lecturas de la radiación que incide sobre cada uno de los paneles en el momento que se aforó. La radiación solar es una medida de la intensidad de la radiación del Sol que llega a una superficie horizontal de la Tierra (irradiación) en un momento dado. La radiación fue expresada en Watts por metro cuadrado (W/m^2). El piranómetro fue colocado a 14° respecto al eje X, debido a que la posición de los paneles era la misma.

Durante los primeros meses del año (enero y febrero) en donde el factor sombra afectó en la captación de radiación de dos paneles, se realizó una ponderación para tener este dato. Esto se realizó únicamente con aquellos paneles que estaban sombreados en el transcurso de la tarde. La ponderación consistió en tres pasos:

- Se midió la radiación durante 10 segundos en la parte más representativa del panel (sombreado o soleado) simultáneamente con la medida de caudal.
- Se midió la radiación, durante 10 segundos igualmente, en la parte menos representativa del panel. En la Figura 6 se puede observar la forma de dividir el panel solar.

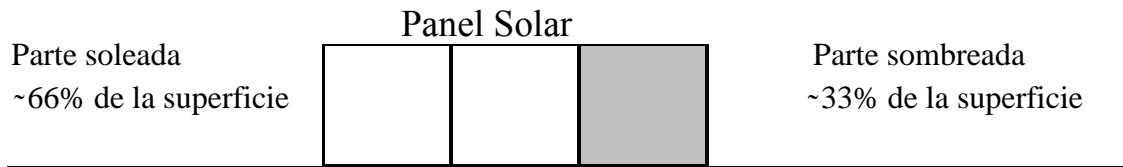


Figura 6. División del panel solar sombreado y soleado.

c. Se realizó un promedio ponderado de ambas lecturas de radiación.

La ponderación se realizó con la fórmula 1:

$$R = (S * P_s) + (F * P_f) \quad [1]$$

R=radiación promedio (W/m^2).

S=radiación del área soleada (W/m^2).

F=radiación del área sombreada (W/m^2).

P_s =porcentaje del panel soleado.

P_f =porcentaje del panel sombreado.

El resultado de la ecuación es el dato que se usó como radiación solar para esa medición.

Para medir el caudal, se utilizó el método directo de aforo y el caudal fue expresado en L/h. Para cada lectura de radiación, había una de caudal. Ambas medidas se agruparon según tratamiento.

Las bombas fueron enumeradas de uno a cuatro. Las bombas uno y tres estuvieron conectadas a paneles de 110W. Las bombas dos y cuatro estuvieron conectadas a paneles de 120W.

Las bombas funcionaron continuamente a lo largo del día mientras la radiación solar fue suficiente para arrancar el motor. Las mangueras de succión llevaron el agua desde la base del reservorio hasta la bomba. Hubo un metro y medio de altura entre el punto de succión y la bomba. Durante la toma de datos, se cerró la válvula que interrumpe el paso del agua hacia las descargas de dos, cuatro, y seis metros. El agua de estas bombas interrumpidas regresó al reservorio por un tubo de retorno. Se abrieron únicamente las válvulas de la bomba que se estuvo evaluando.

La toma de datos se realizó cada media hora desde las 7:00 a.m. hasta las 10:00 a.m. y de 1:00 p.m. hasta las 3:30 p.m. empezando siempre por la bomba uno con sus tres descargas. Esto se realizó de lunes a viernes y los sábados se les brindaba mantenimiento preventivo a las cuatro bombas. Las labores de mantenimiento incluyeron engrasado de la balinera, aplicación de WB-40 en los engranajes y limpieza de la superficie de los paneles solares. Para cada bomba se tomaban tres datos, ya que cada bomba tenía tres alturas de descarga. Luego de hacer esto, se procedía a limpiar el filtro que se encuentra al final de la manguera de succión. Esto se hacía con todas las bombas.

Los modelos de regresión lineal fueron determinados para cada tratamiento. Estos modelos fueron determinados con la función PROC REG de SAS® versión 9.3.

Se utilizaron los modelos de regresión lineal para estimar los caudales instantáneos potenciales, con base en las radiaciones promedio por cada hora de 6:00 a.m. – 5:00 p.m registradas por la estación climatológica Davis Vantage Pro 2 Plus de la E.A.P. La radiación solar fue el promedio mensual de los datos del 2014.

Se utilizaron los modelos de regresión lineal para estimar los caudales potenciales para diferentes rangos de radiación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos de radiación solar y caudal instantáneo, se procedió a realizar un análisis Modelo Lineal General (GLM) el cual nos da una $P < 0.05$. El coeficiente de variabilidad (C.V.) es de 45% y se obtuvo un R^2 de 0.85. La probabilidad afirma que el modelo estadístico fue significativo. Los datos se encuentran dispersos en un 45% y el modelo estadístico explica un 85% de los datos a un nivel de probabilidad de $P < 0.05$.

Se realizó la separación de medias LSMEANS (Least Square Means) en la cual se determinaron los caudales instantáneos promedio para cada tratamiento. En el Cuadro 6 se encuentran los resultados de este procedimiento.

Cuadro 6. Caudales promedios instantáneos y correlaciones entre caudal instantáneo y radiación solar.

Tratamiento	Caudal promedio (L/h)	Correlación caudal y radiación solar ^β	C.V. (%)	Número de observaciones	Probabilidad
110P-2	841 ^a	0.71	26	207	<.0001
110P-4	741 ^b	0.70	29	200	<.0001
110P-6	638 ^c	0.74	34	192	<.0001
120P-2	568 ^d	0.71	38	273	<.0001
120P-4	595 ^d	0.82	36	240	<.0001
120P-6	561 ^d	0.86	39	213	<.0001

^{abcd}Medias en la misma columna con diferente letra muestran diferencias significativas con una $P < 0.05$.

^βCorrelación expresada como coeficiente de correlación Pearson.

Para los datos anteriores, los coeficientes de variabilidad se encuentran entre 26 a 39% lo cual indica que hay una dispersión alta de los datos.

Los sistemas 110P obtuvieron caudales instantáneos mayores en relación a los de 120P en un 48%, 24%, 14% en alturas de descarga de dos, cuatro y seis metros, respectivamente. El sistema de 110P mostró una reducción en caudal del 12% y 14% al aumentar la altura de descarga de dos a cuatro metros y de cuatro a seis metros, respectivamente. Todos los

tratamientos presentan un coeficiente de correlación Pearson positiva entre las variables caudal instantáneo y radiación solar. No existen diferencias significativas entre los tratamientos 120P-2, 120P-4 y 120P-6.

La causa que se le atribuye a la diferencia de rendimiento de los paneles de 110W y 120W, está en las características de los paneles. El de 110W es fabricado por Sunlink y el de 120W fue fabricado por AMRO TECHNOLOGIES. El panel Sunlink (110W) tiene celdas tipo monocristalino, mientras que el panel AMRO (120W) tiene celdas tipo policristalino.

El tipo de celda fotovoltaica define la eficiencia (%) que el panel solar tiene. Las celdas policristalino y monocristalino se diferencian debido al método de elaboración. Las celdas tipo monocristalino son más uniformes por lo que pueden obtener porcentajes de eficiencia de 10 a 17%. En el caso de las celdas policristalino, existe un rango de eficiencia de 10 a 13%. El porcentaje de eficiencia se refiere a la cantidad de W/m^2 que ingresan en una celda solar y que luego son conducidos como Watts hacia el regulador de carga de un panel solar (Iso 2005).

Esta diferencia en las celdas fotovoltaicas podría ser la explicación de porqué el panel de 110W (monocristalino) tuvo un mejor resultado que el de 120W (policristalino).

En el análisis estadístico, se encuentran cuatro fuentes de variación: altura de descarga, sistema de bombeo solar, repeticiones y la interacción entre altura de descarga y sistema de bombeo. Las cuatro fuentes de variación presentan una probabilidad de $P < 0.0001$, es decir, todas fueron significativas. Sin embargo, la fuente de variación más significativa son los sistemas de bombeo solar. Esto se evidencia debido a que los tratamientos pertenecientes al sistema de bombeo con panel de 110W, presentaron medias de caudal instantáneo mayor aquellos con panel de 120W.

Modelos de regresión. Los modelos de regresión fueron determinados con la función PROC REG en SAS® 9.3. Estos presentan una significancia de $P < 0.05$ y explican la relación que hay entre las variables radiación solar y caudal instantáneo. La variable X es radiación solar y la variable Y es caudal instantáneo. La variable radiación solar está expresada en los modelos como “R” y caudal instantáneo con la letra “C”.

En las Figuras 7–12 podemos observar la distribución de los datos de caudal instantáneo obtenidos según datos de radiación solar obtenidos. En cada gráfico se encuentra su modelo de regresión lineal con su R^2 . Los modelos de regresión lineal aplican solo cuando hay radiación solar de $200 W/m^2$ o más. Esto es debido a que los sistemas de bombeo solar no funcionan debajo de este dato de radiación.

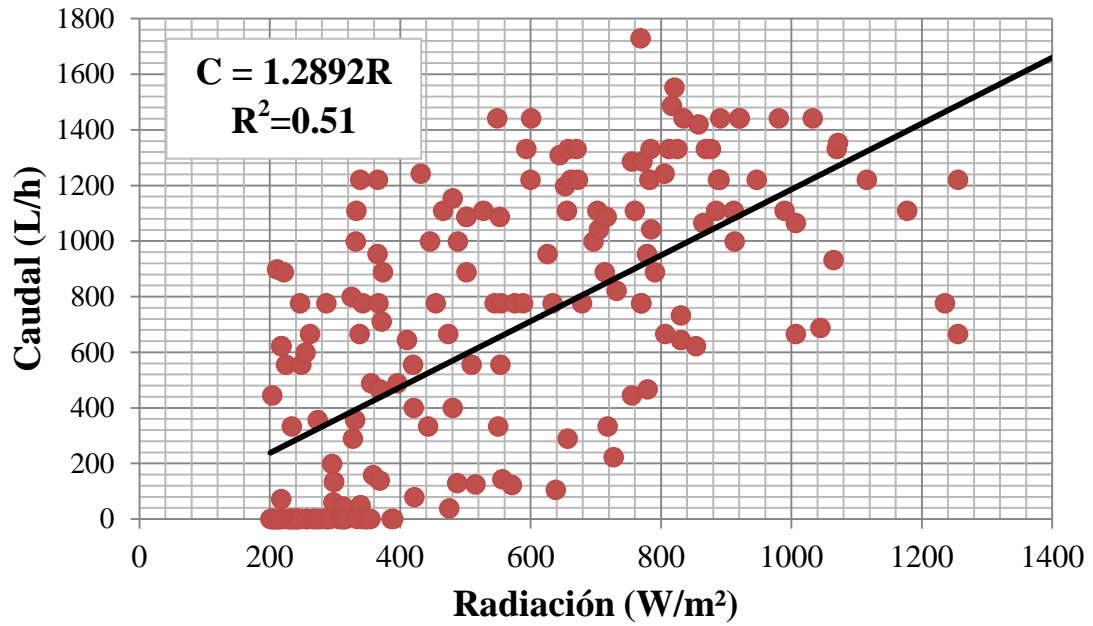


Figura 7. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 2 m.

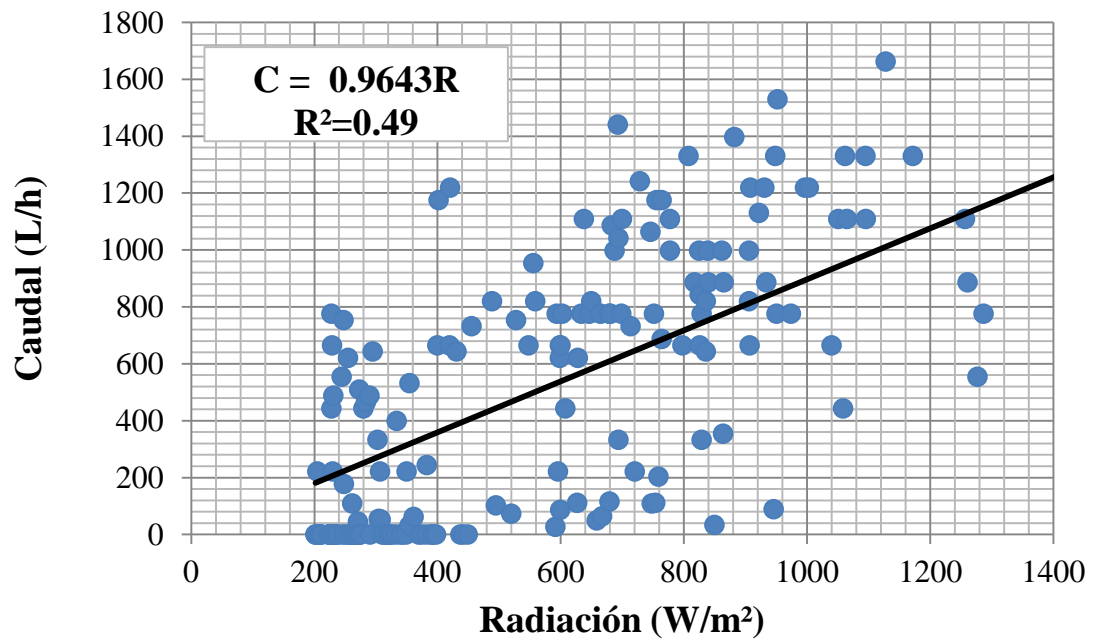


Figura 8. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 4 m.

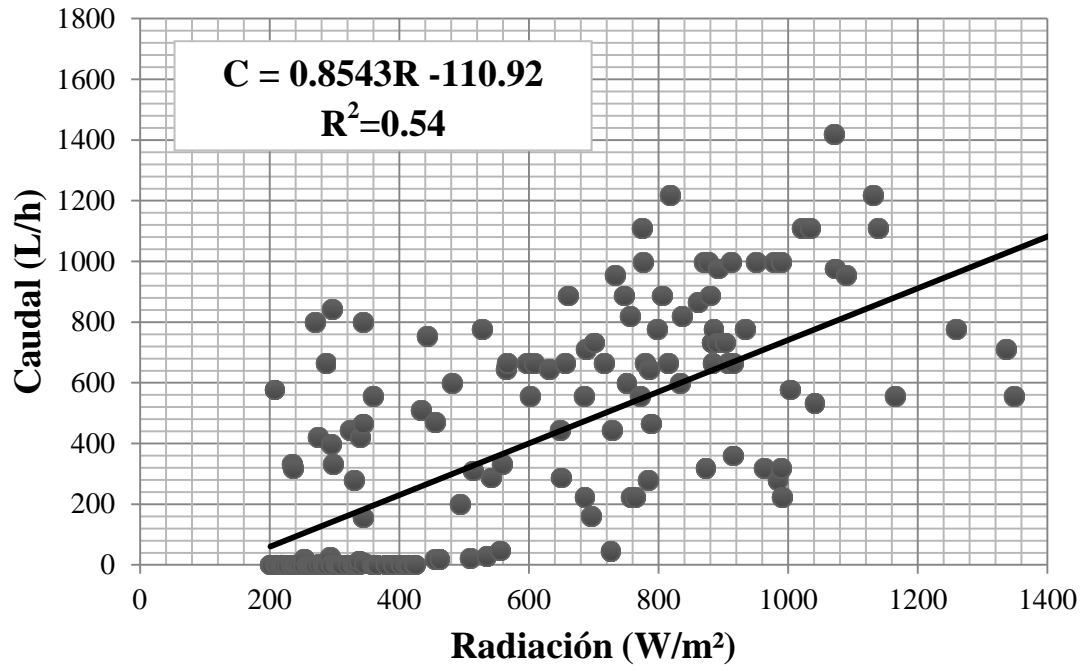


Figura 9. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 110P a una altura de 6 m.

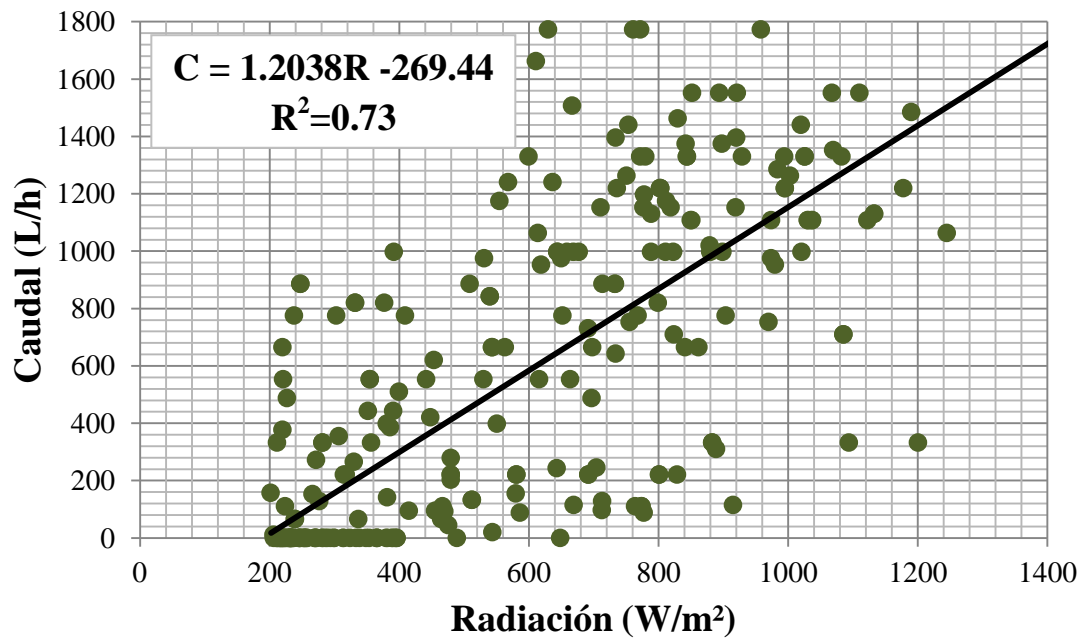


Figura 10. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 2 m.

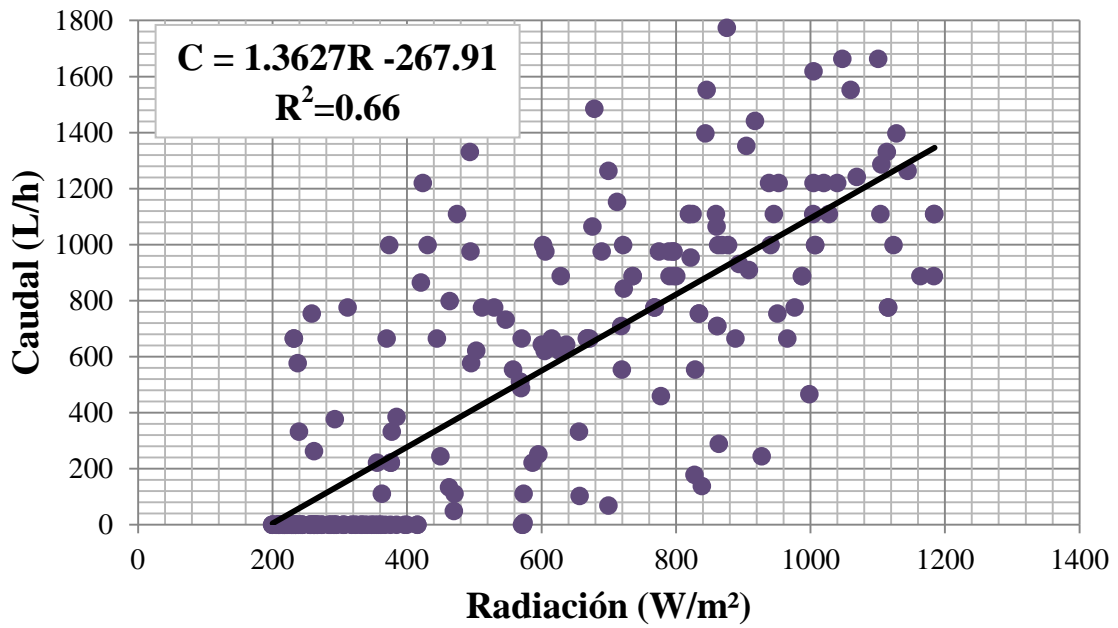


Figura 11. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 4 m.

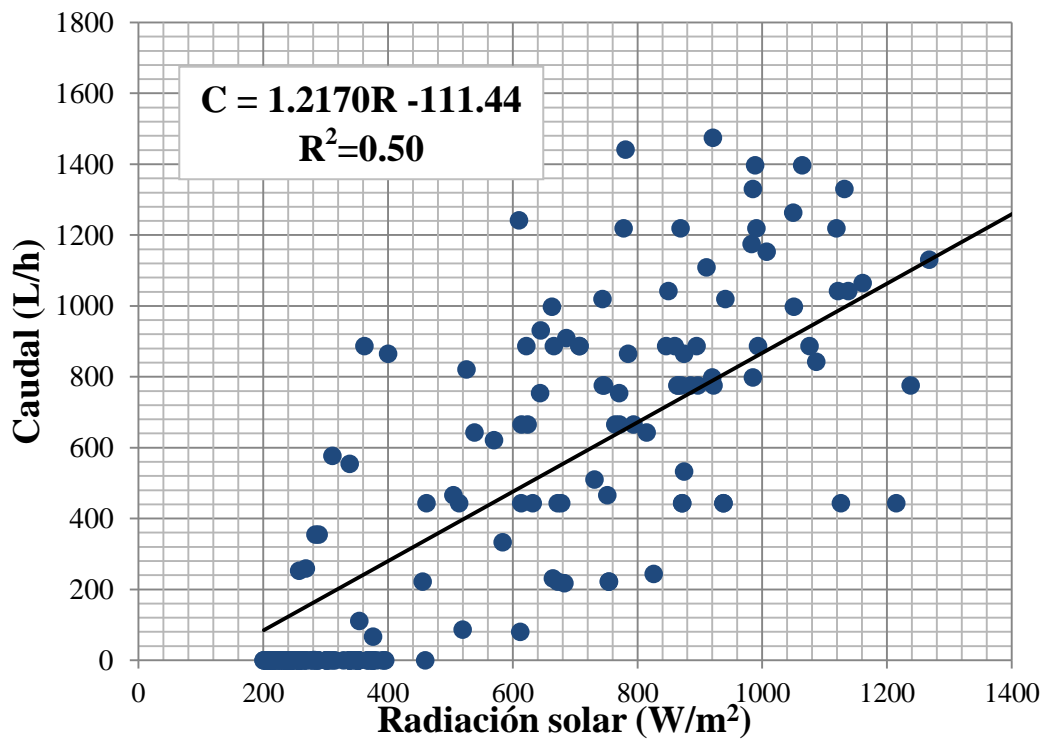


Figura 12. Efecto de la radiación solar en el caudal para el sistema 120P a una altura de 6 m.

Las gráficas de distribución de datos de caudal, muestran la relación estadística entre caudal instantáneo y radiación solar para cada tratamiento. El coeficiente de determinación (R^2) representa que tanto están explicadas las variables dependientes por el modelo de regresión lineal (Rodríguez y Mora 2001).

En el Cuadro 7 se muestran los modelos de regresión lineal. Estos están compuestos por su intercepto y su coeficiente.

Cuadro 7. Modelos de regresión para cada tratamiento.

Tratamiento	Coefficiente	Intercepto	Modelo de regresión	R^2	C.V. (%)
110P-2	1.28917	0	$C = 1.28917R$	0.51	61
110P-4	0.96434	0	$C = 0.96434R$	0.49	68
110P-6	0.85428	-110.9276	$C = 0.85428R - 110.9276$	0.54	73
120P-2	1.21696	-111.4393	$C = 1.21696R - 111.4393$	0.50	67
120P-4	1.36265	-267.9100	$C = 1.36265R - 267.9100$	0.66	62
120P-6	1.20378	-269.4421	$C = 1.20378R - 269.4421$	0.73	66

Los modelos de regresión tienen una significancia de $P < 0.05$.

Para los modelos de regresión lineal, obtenemos el coeficiente, el cual es la pendiente de nuestros modelos. Se obtuvo el intercepto, que es el punto en el cual el modelo toca el eje Y. Los intercepto de los sistemas de bombeo solar con panel de 110W a una altura de dos y cuatro metros de descarga son cero, debido a que antes presentaban un grado de significancia mayor a 0.05. Esto significa que los intercepto no fueron significativos y por esta razón, los intercepto fueron eliminados.

Los modelos de regresión lineal explican de un 49 a un 73% de los datos de caudal. Esto es debido a que los R^2 varían de 0.49 – 0.73. La variación restante se debe a variables que no fueron medidas y que afectan el rendimiento del sistema de bombeo. Los coeficientes de variabilidad son altos (61-73%), es decir, los datos se encuentran bastante dispersos respecto al modelo de regresión lineal.

Los modelos de regresión lineal fueron agrupados para tener una vista clara de su comportamiento según la variación en radiación solar. La Figura 13 muestra los seis modelos de regresión lineal que explican el comportamiento de los caudales instantáneos potenciales de los seis tratamientos, según la radiación solar.

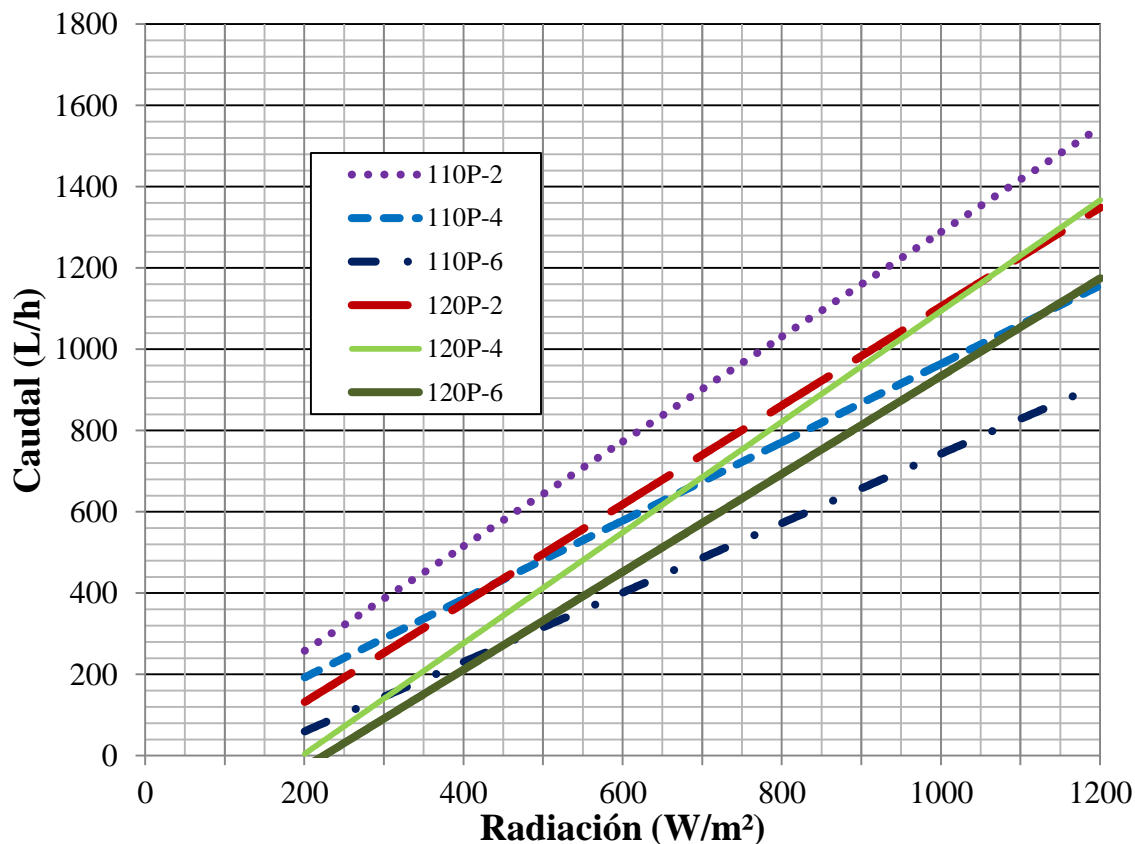


Figura 13. Modelos de regresión lineal para los seis tratamientos.

Para los sistemas de bombeo con panel de 120W, con alturas de dos y cuatro metros, a partir de 1074 W/m^2 el sistema de bombeo de 120W con altura de descarga de cuatro metros obtiene caudales mayores a los obtenidos a una altura de dos metros con el mismo panel solar.

Los modelos de regresión lineal comienzan a partir de radiación de 200 W/m^2 . Esto se debe a que no se obtuvo datos de caudal cuando las lecturas de radiación solar estaban debajo de los 200 W/m^2 .

Este gráfico también ayudará a agricultores que tengan estos sistemas de bombeo, para observar, de una forma conjunta el comportamiento de los dos sistemas y sus alturas de

descarga. Esto con el propósito de determinar cuál de los dos sistemas se adecúa más a sus necesidades de bombeo.

Estimación de caudales potenciales. Con los modelos de regresión lineal se elaboró el Cuadro 8. El cuadro indica el dato de caudal instantáneo promedio se puede obtener según diferentes rangos de radiación solar, que van de 200-1299 W/m².

Cuadro 8. Caudales potenciales promedio según rangos de radiación solar.

Radiación solar (W/m ²)	Caudal potencial promedio (L/h)					
	Sistema 110P			Sistema 120P		
	Altura de descarga (m)			Altura de descarga (m)		
	2	4	6	2	4	6
200 - 299	426	319	172	253	140	91
300 - 399	597	447	285	425	333	262
400 - 499	768	575	398	598	527	433
500 - 599	939	703	511	771	721	604
600 - 699	1,110	830	625	944	914	775
700 - 799	1,281	958	738	1,117	1,108	946
800 - 899	1,452	1,086	851	1,290	1,301	1,117
900 - 999	1,623	1,214	965	1,463	1,495	1,288
1,000 - 1,099	1,794	1,342	1,078	1,636	1,689	1,459
1,100 - 1,199	1,965	1,470	1,191	1,809	1,882	1,630
1,200 - 1,299	2,136	1,598	1,304	1,982	2,076	1,801

Este cuadro se elaboró para que esté a disposición de los agricultores que tengan acceso a este tipo de sistemas de bombeo solar. Ellos tendrán la facilidad de estimar el caudal potencial que pueden obtener basado en la radiación solar que incide en sus respectivas zonas geográficas.

Seguidamente se encuentra un ejemplo de la aplicación del Cuadro 8.

Ejemplo.

Un agricultor tiene un sistema de bombeo solar con un panel solar de 110W, una bomba solar ennos gmbh® y necesita llenar un reservorio que se encuentra a cuatro metros de altura sobre el suelo y la bomba se encuentra a 1.5m del punto de succión.

En la zona, la radiación solar instantánea promedio, de 9:00 a.m. a 11:00 a.m., es de 950 W/m².

Con ayuda del Cuadro 8 se puede calcular cual será el volumen bombeado durante esas dos horas. Según la información que presenta, a una altura de descarga de 4 metros con el

sistema 110P, y dentro del rango de radiación de 900-999W/m², se obtiene un caudal instantáneo potencial de 1,214 L/h. Luego se procede a multiplicarlo por el tiempo. Se estimará con la fórmula 2:

$$V = Q \times t \quad [2]$$

Q =Caudal (L/h)

t = tiempo (h)

V = Volumen bombeado (L)

Despejando así la fórmula:

$$V = (1,214) \times (2)$$

$$\underline{\underline{V = 2,428 L}}$$

El agricultor puede obtener 2,428L en dos horas cuando la radiación solar es de 950W/m², y opera un sistema 110P con altura de descarga a 6 m.

Utilizando los modelos de regresión lineal anteriores, se elaboró el Cuadro 9 que muestra los posibles caudales potenciales con base en los datos de radiación solar de Zamorano en el año 2014.

El Cuadro 9 indica los caudales promedio potenciales para cada sistema a las tres alturas de descarga establecidas bajo las condiciones climatológicas en Zamorano en el 2014. Al final de cada mes se indica la el volumen total de agua bombeado en el día (L) desde 6:00 a.m. a 17:00 p.m.

Cuadro 9. Caudales estimados basados en datos de radiación solar de Zamorano, 2014.

Mes	Horas	Radiación promedio (W/m ²)	Caudales por tratamiento (L/h)					
			110P			120P		
			2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Enero	06:00-07:00	20	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	105	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	249	320	240	101	191	71	30
	09:00-10:00	406	523	391	236	383	285	219
	10:00-11:00	506	652	488	321	504	421	339
	11:00-12:00	544	702	525	354	551	474	386
	12:00-13:00	516	665	498	330	516	435	352
	13:00-14:00	472	609	455	293	463	376	299
	14:00-15:00	434	560	419	260	417	324	253
	15:00-16:00	322	415	310	164	280	170	118
	16:00-17:00	180	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			4,446	3,326	2,059	3,305	2,556	1,996
Febrero	06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	136	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	357	460	344	194	323	218	160
	09:00-10:00	514	663	496	328	514	433	350
	10:00-11:00	626	807	603	424	650	585	484
	11:00-12:00	708	913	683	494	751	697	583
	12:00-13:00	723	933	698	507	769	718	601
	13:00-14:00	640	825	617	436	668	605	501
	14:00-15:00	568	733	548	375	580	507	415
	15:00-16:00	434	560	419	260	417	324	253
	16:00-17:00	275	354	265	124	223	106	61
Volumen diario (L)			6,247	4,673	3,142	4,895	4,192	3,409
Marzo	06:00-07:00	47	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	185	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	392	506	378	224	366	266	203
	09:00-10:00	577	744	556	382	591	518	425
	10:00-11:00	768	990	740	545	823	778	655
	11:00-12:00	886	1143	855	646	967	940	797
	12:00-13:00	889	1146	857	648	970	943	801
	13:00-14:00	811	1046	783	582	876	838	707
	14:00-15:00	689	888	664	477	726	670	559
	15:00-16:00	517	667	499	331	518	437	353
	16:00-17:00	312	403	301	156	269	158	107
Volumen diario (L)			7,531	5,633	3,992	6,106	5,549	4,607

Cuadro 9. Continuación...

Mes	Horas	Radiación promedio (W/m ²)	Caudales por tratamiento (L/h)					
			110P			120P		
			2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Abril	06:00-07:00	67	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	232	299	224	87	171	48	10
	08:00-09:00	418	538	403	246	397	301	233
	09:00-10:00	592	763	571	395	609	539	443
	10:00-11:00	759	979	732	538	813	767	645
	11:00-12:00	849	1094	819	614	922	889	753
	12:00-13:00	836	1078	807	604	906	872	737
	13:00-14:00	721	929	695	505	765	714	598
	14:00-15:00	591	762	570	394	608	538	442
	15:00-16:00	435	561	420	261	418	325	255
	16:00-17:00	259	333	249	110	203	85	42
Volumen diario (L)			7,338	5,489	3,754	5,813	5,078	4,158
Mayo	06:00-07:00	146	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	321	414	310	164	280	170	117
	08:00-09:00	470	606	454	291	461	373	297
	09:00-10:00	593	765	572	396	611	541	445
	10:00-11:00	653	841	629	447	683	621	516
	11:00-12:00	647	835	624	442	676	614	510
	12:00-13:00	552	711	532	360	560	484	395
	13:00-14:00	490	632	473	308	485	400	321
	14:00-15:00	433	558	417	259	415	322	252
	15:00-16:00	276	356	267	125	225	109	63
	16:00-17:00	117	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			5,719	4,278	2,792	4,396	3,634	2,915
Junio	06:00-07:00	577	744	557	382	591	519	426
	07:00-08:00	617	795	595	416	639	572	473
	08:00-09:00	618	797	596	417	641	574	475
	09:00-10:00	589	759	568	392	605	534	439
	10:00-11:00	465	600	449	287	455	366	291
	11:00-12:00	297	383	287	143	250	137	88
	12:00-13:00	190	0	0	0	0	0	0
	13:00-14:00	110	0	0	0	0	0	0
	14:00-15:00	59	0	0	0	0	0	0
	15:00-16:00	107	0	0	0	0	0	0
	16:00-17:00	22	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			4,078	3,050	2,037	3,181	2,703	2,191

Cuadro 9. Continuación...

Mes	Horas	Radiación promedio (W/m ²)	Caudales por tratamiento (L/h)					
			110P			120P		
			2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Julio	06:00-07:00	186	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	243	313	234	96	184	63	22
	08:00-09:00	366	472	353	202	334	231	171
	09:00-10:00	423	545	407	250	403	308	239
	10:00-11:00	523	675	505	336	526	445	361
	11:00-12:00	565	729	545	372	577	503	411
	12:00-13:00	563	726	543	370	574	499	408
	13:00-14:00	537	692	518	348	542	464	377
	14:00-15:00	512	660	494	327	512	430	347
	15:00-16:00	436	563	421	262	420	327	256
	16:00-17:00	284	365	273	131	234	118	72
Volumen diario (L)			5,740	4,293	2,694	4,304	3,388	2,665
Agosto	06:00-07:00	221	284	213	78	157	33	0
	07:00-08:00	235	303	227	90	175	52	14
	08:00-09:00	321	413	309	163	279	169	117
	09:00-10:00	439	566	424	264	423	331	259
	10:00-11:00	631	813	608	428	656	592	490
	11:00-12:00	685	882	660	474	722	665	555
	12:00-13:00	680	877	656	470	716	659	549
	13:00-14:00	633	816	610	430	659	595	493
	14:00-15:00	533	687	514	345	537	459	372
	15:00-16:00	417	537	402	245	396	300	232
	16:00-17:00	227	292	219	83	165	41	4
Volumen diario (L)			6,473	4,842	3,069	4,884	3,895	3,080
Septiembre	06:00-07:00	222	287	214	79	159	35	0
	07:00-08:00	375	483	362	209	345	243	182
	08:00-09:00	540	696	521	350	546	468	381
	09:00-10:00	657	847	633	450	688	627	521
	10:00-11:00	751	968	724	531	802	755	635
	11:00-12:00	716	923	691	501	760	708	593
	12:00-13:00	590	761	569	393	607	537	441
	13:00-14:00	468	603	451	289	458	369	293
	14:00-15:00	372	479	359	207	341	239	178
	15:00-16:00	247	318	238	100	189	68	28
	16:00-17:00	89	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			6,366	4,762	3,109	4,895	4,050	3,250

Cuadro 9. Continuación...

Mes	Horas	Radiación promedio (W/m ²)	Caudales por tratamiento (L/h)					
			110P			120P		
			2 m	4 m	6 m	2 m	4 m	6 m
Octubre	06:00-07:00	57	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	176	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	355	458	342	192	321	216	158
	09:00-10:00	502	647	484	318	499	416	334
	10:00-11:00	590	760	569	393	606	536	441
	11:00-12:00	626	807	604	424	651	585	484
	12:00-13:00	612	789	590	412	634	566	467
	13:00-14:00	555	716	536	364	565	489	399
	14:00-15:00	446	575	430	270	431	339	267
	15:00-16:00	282	364	272	130	232	117	71
	16:00-17:00	115	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			5,116	3,827	2,503	3,938	3,264	2,621
Noviembre	06:00-07:00	49	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	159	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	318	410	307	161	276	166	114
	09:00-10:00	463	597	446	285	452	363	288
	10:00-11:00	533	687	514	345	537	459	372
	11:00-12:00	583	752	562	387	598	527	433
	12:00-13:00	591	762	570	394	608	537	442
	13:00-14:00	512	660	494	326	511	430	347
	14:00-15:00	411	530	396	240	389	292	225
	15:00-16:00	266	343	257	117	213	95	51
	16:00-17:00	109	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			4,741	3,547	2,254	3,584	2,868	2,272
Diciembre	06:00-07:00	34	0	0	0	0	0	0
	07:00-08:00	141	0	0	0	0	0	0
	08:00-09:00	329	424	317	170	289	181	127
	09:00-10:00	483	623	466	302	477	391	312
	10:00-11:00	561	724	541	369	572	497	406
	11:00-12:00	592	763	571	394	609	538	443
	12:00-13:00	605	780	583	406	625	556	459
	13:00-14:00	539	695	520	350	545	467	380
	14:00-15:00	427	551	412	254	408	314	245
	15:00-16:00	291	375	280	137	242	128	80
	16:00-17:00	140	0	0	0	0	0	0
Volumen diario (L)			4,934	3,691	2,382	3,766	3,072	2,452

Estimación de caudales potenciales. El Cuadro 9, es otro ejemplo de la aplicabilidad que se les puede dar a los modelos de regresión obtenidos. Este cuadro cumple la función de ayudar a planear actividades agrícolas según la disponibilidad de agua. Según el Cuadro 9, en Zamorano se pueden obtener volúmenes diarios de hasta 7,338 L en abril con el sistema 110P, a una altura de dos metros, y se pueden obtener volúmenes diarios tan bajos como en enero con 1,996 L con el sistema 120P a una altura de 6 metros.

En el Cuadro 10, podemos observar los volúmenes potenciales bombeados para cada día promedio de cada mes y el acumulado anual. Este cuadro también cumple la función de planificar actividades agrícolas.

Cuadro 10. Volumen promedio diario y acumulado mensual según la radiación solar de Zamorano para 2014.

	Volumen bombeado (m ³)											
	110P-2		110P-4		110P-6		120-2		120P-4		120P-6	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Enero	4.4	137.8	3.3	103.1	2.1	63.8	3.3	102.5	2.6	79.2	2.0	61.9
Febrero	6.2	174.9	4.7	130.9	3.1	88.0	4.9	137.0	4.2	117.4	3.4	95.4
Marzo	7.5	233.5	5.6	174.6	4.0	123.8	6.1	189.3	5.5	172.0	4.6	142.8
Abril	7.3	220.2	5.5	164.7	3.8	112.6	5.8	174.4	5.1	152.3	4.2	124.7
Mayo	5.7	177.3	4.3	132.6	2.8	86.5	4.4	136.3	3.6	112.7	2.9	90.4
Junio	4.1	122.3	3.1	91.5	2.0	61.1	3.2	95.4	2.7	83.8	2.2	67.9
Julio	5.7	177.9	4.3	133.1	2.7	83.5	4.3	133.4	3.4	105.0	2.7	82.6
Agosto	6.5	200.7	4.8	150.1	3.1	95.1	4.9	151.4	3.9	120.7	3.1	95.5
Septiembre	6.4	191.0	4.8	142.9	3.1	93.3	4.9	146.8	4.0	121.5	3.2	97.5
Octubre	5.1	158.6	3.8	118.6	2.5	77.6	3.9	122.1	3.3	101.2	2.6	81.3
Noviembre	4.7	142.2	3.5	106.4	2.3	67.6	3.6	107.5	2.9	86.0	2.3	68.2
Diciembre	4.9	153.0	3.7	114.4	2.4	73.9	3.8	116.8	3.1	95.2	2.5	76.0
Volumen anual (m ³)		2,089.3		1,562.9		1,026.8		1,612.9		1,347.1		1,084.2

4. CONCLUSIONES

- Los tratamientos que pertenecen al sistema 110P (panel solar de 110W) presentaron un caudal promedio mayor que los que pertenecen al 120P (panel solar de 120W), en 48%, 24%, 14% en alturas de descarga de dos, cuatro y seis metros, respectivamente. Para los sistemas de bombeo con panel de 110W, se mostró una reducción en caudal del 12% y 14% al aumentar la altura de descarga de dos a cuatro metros y de cuatro a seis metros, respectivamente.
- Se determinaron los modelos de regresión lineal que correlacionan caudal y radiación solar que incide sobre cada tratamiento.
- Se elaboró una guía que indica los caudales potenciales promedio que se pueden producir según diferentes rangos de radiación solar, el cual puede ser utilizado para estimar el volumen que se puede bombear bajo diferentes condiciones de radiación solar.

5. RECOMENDACIONES

- Utilizar el sistema de bombeo solar con panel de 110W Sunlink (monocristalino) ya que presenta un caudal potencial instantáneo mayor. Esto es válido siempre y cuando los sistemas tengan las mismas características mencionadas.
- Utilizar paneles que sean del mismo tipo de celda solar y diferente potencia para evaluar rendimientos obtenidos.
- Aumentar el número de unidades experimentales para reducir el error experimental y obtener resultados aún más confiables.
- Ubicar los paneles solares en un lugar donde el efecto sombra de cualquier objeto no afecte el estudio.

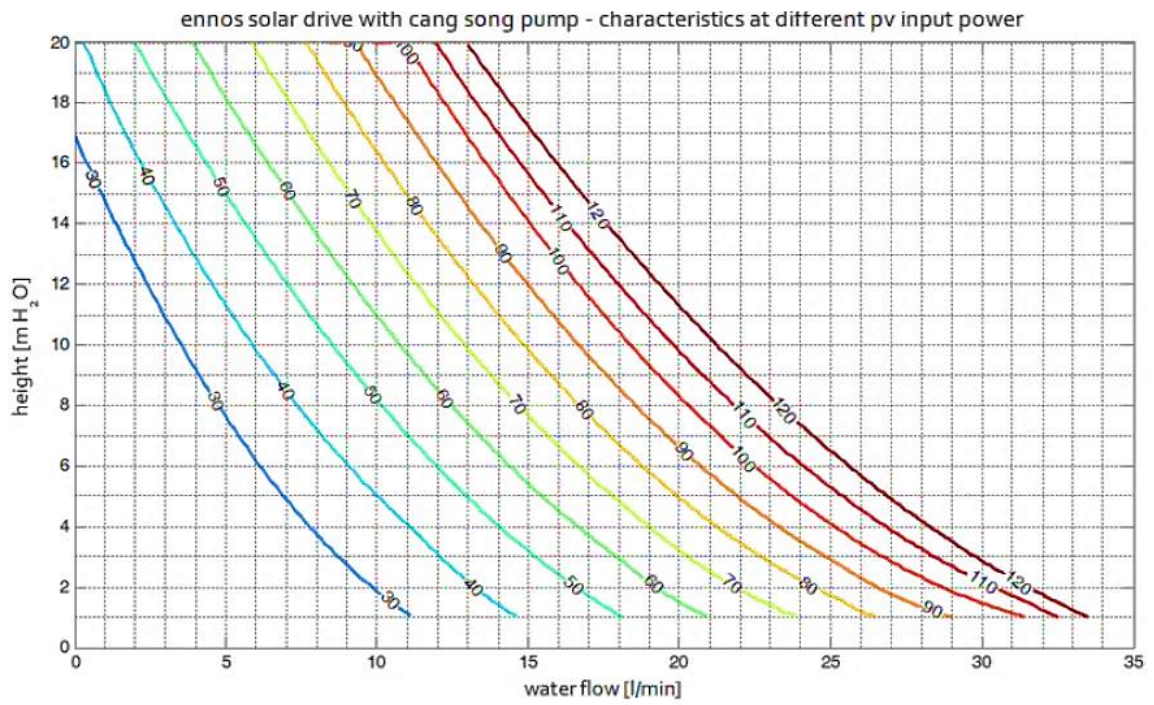
6. LITERATURA CITADA

- Almeida, M.A. y A.P. Elvir, 2014. Evaluación de dos sistemas solares para bombeo de agua, en el valle del Río Yeguaré, Honduras. Tesis Ing. Agr. El Zamorano, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana, p.1-2.
- APPA, 2009. ¿Qué es la energía solar fotovoltaica? (en línea) Consultado el 29 de enero del 2015) Disponible en http://www.appa.es/09fotovoltaica/09que_es.php
- Beckman, J., A. Borchers, y C.A. Jones. 2013. Agriculture's Supply and Demand for Energy and Energy Products. Agriculture as a User of Energy: 9-15. Consultado el 22 de febrero del 2015. Disponible en <http://www.ers.usda.gov/media/1104145/eib112.pdf>
- FAO, 2015. Agricultura “inteligente” a nivel energético para evitar la dependencia de los combustibles fósiles (en línea) Consultado el 15 de febrero de 2015. Disponible en <http://www.fao.org/news/story/es/item/95220/icode/>
- iDE, 2015. Entry Point: Water (en línea). Consultado el 2 de febrero del 2015. Disponible en <http://www.ideorg.org/WhatWeDo/Water.aspx>
- iHS solarbuzz, 2015. Regional PV Markets: Europe. (en línea) Consultado el 15 de enero del 2015. Disponible en <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/market-facts/regional-pv-markets-europe>
- Iso, O., 2005. Module 3, Solar Photovoltaic. (en línea). Workshop on Renewable Energies, Republic of the Fiji Islands. Consultado el 24 de julio del 2015. Disponible en: http://www.globalelectricity.org/Projects/Fiji/Solar-PV_fichiers/3-1%20Basic%20Principles.pdf
- Lisei, D. 2012. Bombeo de Agua por Energía Solar. Fiasa Energías Renovables (en línea) Consultado el 11 de febrero del 2015. Disponible en: http://inta.gob.ar/documentos/presentacion-de-8va-jornada-regional-sobre-manejo-de-pastizal-natural-en-san-cristobal-santa-fe/at_multi_download/file/Bombeo_de_Agua_por_Energia_Solar.pdf

- Pittock, A.B. 2005. Climate Change; turning up the heat. National Library of Australia, 133 p.
- Ray, P.K. 1981. AGRICULTURAL INSURANCE. Theory and Practice and Application to Development Countries 2nd Edition. Pergamon Press, p. 6-14.
- Rodríguez, M.J. y Mora, R. 2001. Estadística informática: Análisis de regresión simple (en línea). San Vicente del Raspeig, España. Pág. 6. Consultado el 11 de julio del 2015. Disponible en <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8141/1/REGRESION%20SIMPLE.pdf>
- Thomas, M.G. 1996. Bombeo Solar: La Alternativa Solar. Photovoltaic Systems Design Assistance Center, Sandia National Laboratories. NM. Estados Unidos, p. 1-3.
- Vezzini, A., 2011. La Bomba de Baja Energía Solar (en línea). Consultado el 5 de febrero del 2015. Disponible en http://www.bfh.ch/fileadmin/docs/newsmeldungen/2013/Brochure_SolarWaterPump_BFH_2013.pdf

7. ANEXOS

Anexo 1. Estudios realizados con sistemas de bombeo ennos gmbh® con potencias constantes.



Fuente: La Bomba de Baja Energía Solar, Vezzini, A., 2011.

