

**Estimación del caudal potencial de dos
sistemas de bombeo solar a diferentes cargas
dinámicas totales**

María Belén Cepeda Solís

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Estimación del caudal potencial de dos sistemas de bombeo solar a diferentes cargas dinámicas totales

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

Presentado por

María Belén Cepeda Solís

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Estimación del caudal potencial de dos sistemas de bombeo solar a diferentes cargas dinámicas totales

María Belén Cepeda Solís

Resumen. El riego es uno de los factores más importantes en el ámbito agrícola. Los productores buscan minimizar costos y afrontar los problemas de baja disponibilidad de agua, es por eso que el uso de la energía solar es una solución. Los sistemas de bombeo solar funcionan con energía limpia que proviene de la radiación emitida a los paneles solares. El objetivo de este estudio fue estimar los caudales potenciales en L/h a distintas radiaciones solares en las bombas sunlight y sunflower con diferentes cargas dinámicas totales. Se realizó un análisis de regresión simple utilizando como variable independiente la radiación solar y variable dependiente el caudal. La bomba sunlight estaba conectado a un panel de 150 W. Se evaluó alturas de descarga de 9, 12, 15 y 18 m con alturas de succión 1 y 3 m. Se obtuvo un total de ocho tratamientos para esta bomba. La bomba sunflower estaba conectada a un panel de 80 W. Se evaluó a alturas de descarga de 3, 6 y 9 m con alturas de succión de 1 y 3 m. Se obtuvo un total de seis tratamientos. Existe una correlación positiva dada por los coeficientes de correlación de Pearson entre variables de radiación solar y caudal instantáneo. Con los modelos de regresión se determinó caudales potenciales a diferentes radiaciones solares.

Palabras clave: Bomba solar, cargas dinámicas, energía limpia.

Abstract. Irrigation is one of the most important facts in agriculture. Agriculturist look for reduce costs and face water's availability problems, for this reason the use of sun's energy is the solution. Solar pumping systems run on with clean energy, which proceed to the radiation emitted to solar panels. The study objective was estimated by potential flows in L/h to different solar radiations in sunlight and sunflower pumps with different total dynamics loads. It has been made a simple regression analysis using as independent variable the solar radiation and as dependent variables the flow. The sunlight pump was connected to a panel of 150W. It was evaluated at discharged heights of 9, 12, 15 and 18 m with suction heights of 1 and 3 m. They could obtain eight total treatments for this pump. The sunflower pump was connected to a panel of 80 W. It was evaluate at discharge heights of 3, 6 and 9 m with suction heights of 1 and 3 m. With a result of six total treatments. There is a positive correlation given by the Pearson's correlation coefficients between the solar radiation and instant flow variables. With the regression models we can determinate the potential flow to different solar radiations.

Key words: Clean energy, dynamic charges, solar pump.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
4. CONCLUSIONES	16
5. RECOMENDACIONES	17
6. LITERATURA CITADA	18
7. ANEXOS	20

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Promedios mensuales y acumulados de variables climáticas en la Escuela Agrícola Panamericana durante los meses de junio, julio y agosto del 2017. ...	3
2. Tratamientos del sistema de bombeo sunlight.	8
3. Tratamientos del sistema de bombeo sunflower	8
4. Coeficiente de correlación entre tratamientos para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunlight.....	10
5. Modelos de regresión lineal de cada tratamiento para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunligh.....	11
6. Caudales potenciales promedios para la bomba sunlight a distintos rangos de radiación solar.	12
7. Coeficiente de correlación entre tratamientos para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunflowe.	13
8. Modelos de regresión lineal de cada tratamiento para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunflower	14
9. Caudales potenciales promedios para la bomba sunflower a distintos rangos de radiación solar.	15
Figuras	Página
1. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de junio.	4
2. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de julio.....	4
3. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de agosto.....	5
4. Cisterna de agua.	6
5. Estructura de descarga.....	6
6. Probeta de 1000 mL.....	6
7. Piranómetro Ambient Weather SOLAR POWER METER.....	6
8. Bomba sunflower.....	7
9. Panel solar de 80 W conectado a la bomba sunflower.....	7
10. Bomba sunlight.....	7
11. Panel solar de 150 W conectado a la bomba sunlight.....	7
12. Estimación de caudales potenciales a diferentes alturas dinámicas para la bomba sunlight.	13

13. Caudales potenciales de la bomba sunflower a diferentes alturas dinámicas ...	15
---	----

Anexos

Página

1. Ejemplo de caudales potenciales estimados basados en datos de radiación solar de enero del 2017 en la Escuela Agrícola Panamericana para la bomba sunflower	20
2. Ejemplo de caudales potenciales estimados basados en datos de radiación solar de enero del 2017 en la Escuela Agrícola Panamericana para la bomba sunlight	20

1. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola existe desde hace mucho tiempo para suplir las necesidades del ser humano. Con el paso de los años se ha tecnificado realizando diversas actividades que ayuden a maximizar su producción, entre las cuales se encuentra el riego de los cultivos. Riego es el suministro adicional de agua al perfil del suelo de una forma artificial en un momento oportuno y en cantidades necesarias de los cultivos para la obtención de una producción sostenible (Álvarez et al. 2012).

Actualmente, los agricultores buscan maneras de reducir los costos de producción. La agricultura enfrenta un reto muy importante con respecto a la seguridad alimentaria, lo que exige producir de una manera eficiente y sostenible (IICA 2012). Los productores a pequeña escala no disponen de energía eléctrica en sus campos de producción por lo que se han buscado diferentes soluciones ante esta problemática. Las bombas solares tienen la capacidad de extraer el agua necesaria para suplir las necesidades hídricas de los cultivos y así disminuir los costos de producción (FAO 2011).

Un sistema de bombeo consta de dos partes, una bomba la cuál descarga agua a una presión determinada y de un motor el cuál se encarga de proporcionar la energía que requiere la bomba (Andrade y Asuaje 2010). Las bombas de riego se pueden clasificar en centrífugas, axiales y sumergibles. Los motores que proporcionan la energía se clasifican en eléctricos y de combustión. Los motores eléctricos pueden ser accionados por energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles, energía eólica, energía hidráulica y energía solar (Seyboth et al. 2011).

Los sistemas de bombeo impulsados por energía solar se componen por tres partes: paneles fotovoltaicos, inversor y bomba. La producción de energía fotovoltaica se basa en el efecto del silicio en generar energía eléctrica cuando se expone a radiación solar. La célula fotovoltaica es la que se encarga de esta transformación.

La luz está compuesta por fotones los cuales transportan energía y ésta es absorbida por el silicio. Existen diferentes materiales para los paneles fotovoltaicos: silicio Mono-cristalino, tiene un rendimiento energético del 15-17%; silicio Poli-cristalino, cuenta con un rendimiento energético del 12-14 % y silicio Amorfo: es el menos eficiente, rendimiento energético menor al 10% (Uzquiano et al. 2015).

Los paneles fotovoltaicos reciben la energía solar y la transforman en energía eléctrica continua (DC). La electricidad es enviada al inversor el cual se encarga de transformarla a energía alterna (AC) para accionar el motor de la bomba (Martín et al. 2011). Dependiendo de la cantidad de radiación solar el motor puede girar a diferentes velocidades. La energía producida por los paneles tiene un efecto proporcional en el caudal y presión descargado por la bomba.

International Development Enterprises (iDE) en Honduras es una organización sin fines de lucro que se encarga de investigar para mejorar los rendimientos de pequeños productores. Esta organización promueve el desarrollo de tecnologías de energía limpia a pequeña escala. iDE, junto a la Escuela Agrícola Panamericana, se ha encargado de desarrollar varios proyectos en el Centro para la Producción e Innovación Rural Sostenible (CEPiRS, ubicado en la EAP Zamorano). Estos proyectos se han basado en tecnologías de riego inteligente (iDE Honduras 2016).

Según Almeida y Elvir (2014) quienes evaluaron dos sistemas solares, no se tuvo un comportamiento uniforme por lo que no se recomienda su uso. Sin embargo, con paneles de 80W el caudal de la bomba fue de 455 L/h promedio y con paneles de 120W se el caudal de la bomba fue 910 L/h promedio. Este estudio se realizó los primeros tres meses del año en donde hubo una radiación solar promedio de 590 W/m². Ávila y Suchini (2015) también realizaron un estudio de sistema de bombeo solar. Utilizaron paneles de 110W con lo que obtuvieron un caudal promedio de 740 L/h mientras que con paneles de 120W se obtuvo un caudal promedio de 575 L/h. Este estudio se realizó los cuatro primeros meses del año en donde se obtuvo una radiación solar promedio de 432.4 W/m².

En este estudio se evaluaron dos sistemas. El primer sistema de bombeo utilizado fue el modelo “sunlight” el cual trabajó con un panel de 150 W y las alturas de descarga que se utilizaron fueron de 9, 12, 15 y 18 m. El segundo sistema de bombeo corresponde a la bomba de modelo “sunflower”, la cual estaba conectada a un panel de 80 W y las alturas de descarga fueron de 3, 6 y 9 m. En ambos sistemas las alturas de succión fueron de 1 y 3 m.

El objetivo de este estudio fue estimar los caudales potenciales, en L/h, a distintas radiaciones solares en las bombas sunlight y sunflower con diferentes cargas dinámicas totales.

2. METODOLOGÍA

Ubicación.

El experimento se realizó en el Centro Productivo para la Innovación Rural Sostenible (CEPiRS), en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (EAP), San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras; ubicada a 800 msnm. El estudio se realizó de junio a agosto del 2017 (Cuadro 1) (Figura 1, 2 y 3).

Cuadro 1. Promedios mensuales y acumulados de variables climáticas en la Escuela Agrícola Panamericana durante los meses de junio, julio y agosto del 2017.

Mes/ Factor	Promedio				Acumulado
	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Viento (m/s)	Radiación solar (W/m ²)	Precipitación (mm)
Junio	25.7	55.2	0.2	453.1	437.6
Julio	25.2	56.7	1.8	442.4	147.4
Agosto	25.1	58.8	2.1	464.9	96.4

Datos obtenidos de la estación climatológica Zorrales Davis.

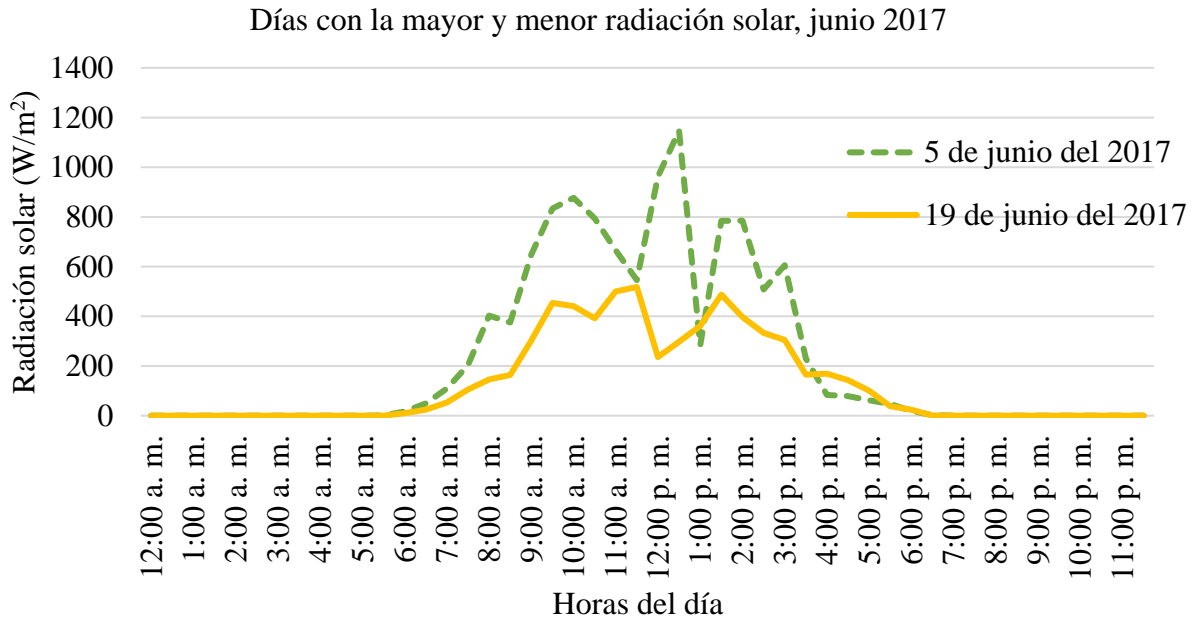


Figura 1. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de junio. Fuente: Datos obtenidos de la estación climatológica Zorrales Davis.

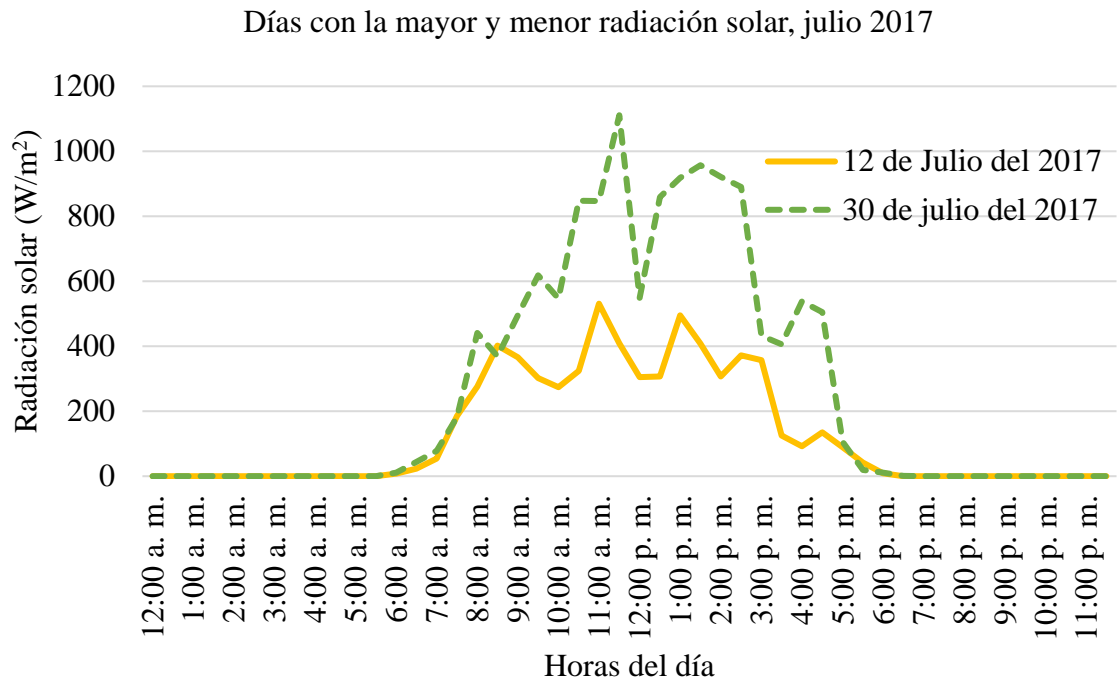


Figura 2. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de julio. Fuente: Datos obtenidos de la estación climatológica Zorrales Davis.

Días con la mayor y menor radiación solar, junio 2017

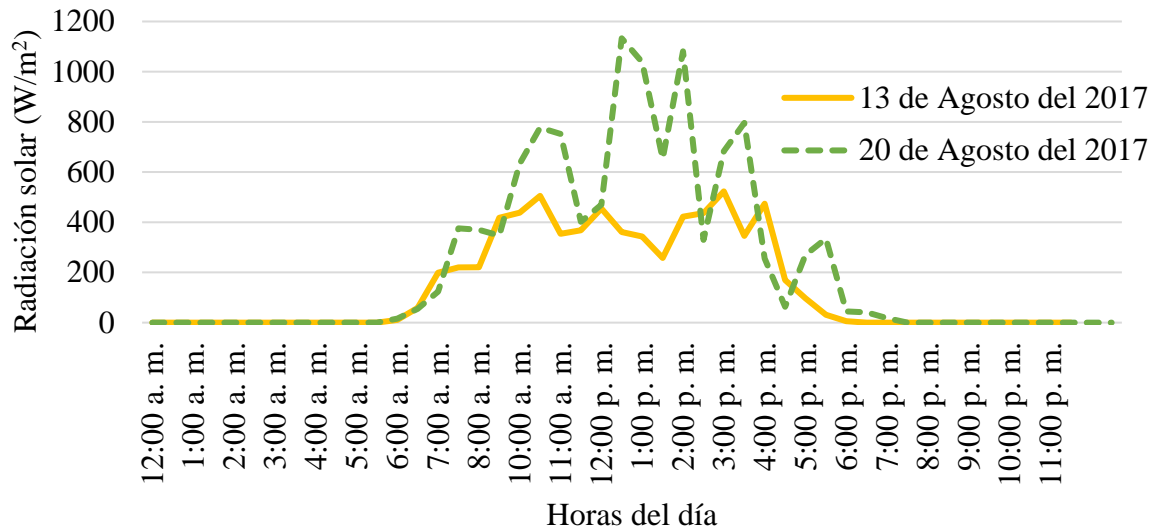


Figura 3. Radiación solar de los días de máxima y mínima radiación durante el mes de agosto

Fuente: Datos obtenidos de la estación climatológica Zorrales Davis.

Materiales.

Se utilizó una cisterna con un volumen de 16 m³ la cual fue la fuente de agua (Figura 4), también se usó una estructura de descarga que simulaba las diferentes alturas de descarga de cada tratamiento (Figura 5). La estructura estaba conectada por tuberías de PVC de 1 pulg; SDR 26 y 23 m de longitud para la bomba sunlight y 24 m para la bomba sunflower. Las tuberías constaron de ocho válvulas marca Ipex y de 1 pulg. Para la succión se usó dos mangueras flexibles de 25 mm de diámetro, una para cada bomba. La mano de obra necesaria para la toma de datos fue de dos personas. Para la recolección del caudal se usó un balde de 15 L, un cronómetro y probeta de 1000 mL (Figura 6). Para la toma de radiación solar se usó un piranómetro marca Ambient Weather modelo SOLAR POWER METER TM-206 (Figura 7) y finalmente se usaron dos bombas solares: Sunflower (Figura 8) conectada a un panel solar de 80 W (Figura 9) y la bomba sunlight (Figura 10) conectada a un panel solar de 150 W (Figura 11).



Figura 4. Cisterna de agua.



Figura 5. Estructura de descarga.



Figura 6. Probeta de 1000 mL.



Figura 7. Piranómetro Ambient Weather SOLAR POWER METER.



Figura 8. Bomba sunflower.



Figura 9. Panel solar 80 W conectado a la bomba sunflower.

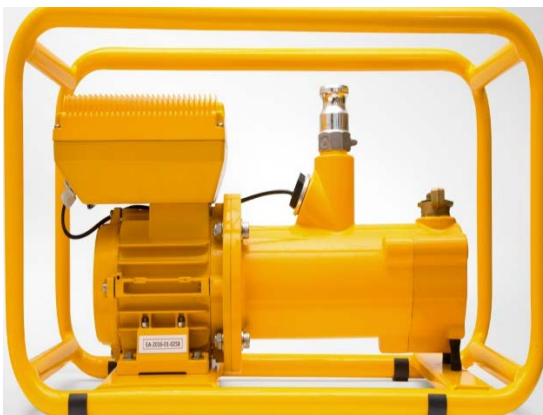


Figura 10. Bomba sunlight.



Figura 11. Panel solar 150 W conectado a la bomba sunlight.

Tratamientos.

Se evaluaron dos sistemas de bombeo, cada uno conectado a un panel solar independiente y a diferentes alturas de descargas estáticas.

Sunlight. El primer sistema fue la bomba sunlight, la cual estaba conectada a un panel solar de 150 W de potencia. Se usaron alturas de descarga de 9, 12, 15 y 18 m y alturas estáticas de succión de 1 y 3 m. Las interacciones entre alturas estáticas de descarga y de succión dieron un total de ocho tratamientos: 1 m de altura de succión \times 9 m de altura de descarga, 3 m de altura de succión \times 9 m de altura de descarga, 1 m de altura de succión \times 12 m de altura de descarga, 3 m de altura de succión \times 12 m de altura de descarga, 1 m de altura de succión \times 15 m de altura de descarga, 3 m de altura de succión \times 15 m de altura de descarga, 1 m de altura de succión \times 18 m de altura de descarga y 3 m de altura de succión \times 18 m de altura de descarga (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos del sistema de bombeo sunlight.

Tratamiento	Altura estática de		Carga estática total (m)
	succión (m)	descarga (m)	
1 × 9	1	9	10
3 × 9	3	9	12
1 × 12	1	12	13
3 × 12	3	12	15
1 × 15	1	15	16
3 × 15	3	15	18
1 × 18	1	18	19
3 × 18	3	18	21

Sunflower. El segundo sistema fue la bomba sunflower, la cual estaba conectada a un panel solar de 80 W de potencia. Se usaron alturas estáticas de descarga a 3, 6 y 9 m y alturas estáticas de succión de 1 y 3 m. Las interacciones entre alturas estáticas de descarga y de succión dieron un total de seis tratamientos: 1 m de altura de succión × 3 m de altura de descarga, 3 m de altura de succión × 3 m de altura de descarga, 1 m de altura de succión × 6 m de altura de descarga, 3 m de altura de succión × 6 m de altura de descarga, 1 m de altura de succión × 9 m de altura de descarga y 3 m de altura de succión × 9 m de altura de descarga (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos del sistema de bombeo sunflower.

Tratamiento	Altura estática de		Carga estática total (m)
	succión (m)	descarga (m)	
1 × 3	1	3	4
3 × 3	3	3	6
1 × 6	1	6	7
3 × 6	3	6	9
1 × 9	1	9	10
3 × 9	3	9	12

Variables.

Se midieron dos variables: radiación solar y caudal.

Radiación Solar. Se conoce por radiación solar al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol que alcanzan la superficie de la tierra (Álvarez et al. 2012). Para la medición de radiación solar se usó un piranómetro. Las lecturas fueron expresadas en watts por metro cuadrado (W/m^2). Para realizar las lecturas de radiación solar se ubicó el piranómetro paralelo al panel solar de la bomba, esto con el fin de tener un valor aproximado de radiación solar que estaba recibiendo el panel.

Caudal. Se conoce como caudal al movimiento de agua en un tiempo determinado. Para medir caudal se usó un balde de 15 L, un cronómetro y una probeta de 1000 mL. El método de aforo utilizado fue el directo el cual se basa en tomar todo el volumen en un tiempo determinado (Álvarez et al. 2012). La fórmula de aforo directo es la siguiente:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Donde:

Caudal: expresado en litros por hora

Volumen: expresado en litros

Tiempo: expresado en segundos

Esta fórmula fue empleada en todos los datos obtenidos para calcular el caudal por bomba con diferentes radiaciones solares.

Toma de datos.

Los datos se tomaron a las 7:00 am, 8:30am, 10:00 am, 11:30am, 1:00 pm, 2:30pm y 4:00 pm de lunes a sábado por 48 días para el primer sistema y 36 días para el segundo sistema. Para la recolección de datos en ambos sistemas se siguió el siguiente protocolo:

1. Limpiar el panel solar con un trapo.
2. Abrir la válvula de la bomba.
3. Abrir la válvula de paso de la altura que será evaluada.
4. Encender la bomba.
5. Dejar salir el caudal durante dos minutos previo a la lectura de caudal

Pasos del 6-9 se realizan simultáneamente:

6. Tomar la radiación solar colocando el piranómetro a lado del panel solar.
7. Con la ayuda de un balde recolectar el caudal por 15 segundos.
8. Oprimir el botón **M-H** del piranómetro y sacar el promedio de la radiación solar máximo y mínima.
9. Anotar la radiación solar en el formato.
10. Con la probeta medir cuánta agua se recolecto.
11. Calcular el caudal usando la fórmula.
12. Anotar el caudal en el formato.

Diseño experimental.

Para este estudio se utilizó un análisis de regresión simple donde la variable independiente fue la radiación solar y la dependiente fue el caudal. Se calcularon caudales potenciales para dos tipos de bombas y a partir de estas estimaciones se estableció un análisis de correlación simple y se elaboró el modelo de regresión lineal. El nivel de probabilidad fue de 95%; utilizándose el programa “Statistical Analysis System” (SAS® versión 9.4).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sunlight.

Coefficiente de correlación. El coeficiente de correlación para los tratamientos de la bomba sunlight se encuentra en un rango de 87-99%. Se consideran altos e indica que hay una relación directa entre radiación solar y caudal emitido (Cuadro 4).

Coefficiente de variación. El coeficiente de variación se mantuvo entre 7-26 % lo que indica que no hay dispersión alta de los datos. Esto difiere con Ávila y Suchini (2015) donde obtuvieron coeficientes de variación de 26-39 % (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficiente de correlación entre tratamientos para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunlight.

Tratamiento	Altura estática de		Coeficiente de correlación (%)	CV (%)
	succión (m)	descarga (m)		
1 × 9	1	9	87	26
3 × 9	3	9	97	18
1 × 12	1	12	8	7
3 × 12	3	12	94	11
1 × 15	1	15	96	11
3 × 15	3	15	99	7
1 × 18	1	18	92	19
3 × 18	3	18	95	12

Modelos de regresión. El coeficiente de determinación e intercepto son constantes que fueron obtenidas por el programa SAS® 9.4 usando la función PROC PEG para cada tratamiento. El siguiente cuadro representa el modelo de regresión de cada tratamiento con su respectivo R^2 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Modelos de regresión lineal de cada tratamiento para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunlight.

Tratamiento	Alturas estáticas de		Coeficiente de determinación	Intercepto	Modelo de regresión	R ²
	succión (m)	descarga (m)				
1 × 9	1	9	1.91	-51.6	Q= -51.6 + 1.9 (Rad)	0.75
3 × 9	3	9	1.44	-29.8	Q= -29.8 + 1.4 (Rad)	0.91
1 × 12	1	12	0.72	231.9	Q= 231.9 + 0.7 (Rad)	0.93
3 × 12	3	12	0.83	118.8	Q= 18.8 + 0.8 (Rad)	0.83
1 × 15	1	15	0.85	-110.8	Q= -110.8 + 0.8 (Rad)	0.93
3 × 15	3	15	0.86	-119.3	Q= -119.3 + 0.8 (Rad)	0.91
1 × 18	1	18	0.32	125.6	Q= 25.6 + 0.3 (Rad)	0.85
3 × 18	3	18	0.32	-25.7	Q= -25.7 + 0.3 (Rad)	0.77

Q: caudal; Rad: Radiación solar

Con los modelos obtenidos se puede proyectar el caudal (variable dependiente) a partir de la radiación (variable independiente).

Estimación de caudales potenciales. Con la fórmula de los modelos de regresión se calculó los caudales potenciales a diferentes radiaciones solares. Dado que en siete de ocho tratamientos la bomba no emitió caudal a radiaciones iguales o menores de 200 W/m² el modelo de regresión lineal se aplica de 300 - 1300 W/m² (Cuadro 6).

Cuadro 6. Caudales potenciales promedios para la bomba sunlight a distintos rangos de radiación solar.

Radiación solar (W/m ²)	Caudal potencial promedio (L/h)							
	Tratamientos							
	1 × 9	3 × 9	1 × 12	3 × 12	1 × 15	3 × 15	1 × 18	3 × 18
300	518	390	312	258	129	120	115	64
400	708	530	511	338	209	200	145	94
500	898	670	581	418	289	280	175	124
600	1,088	810	651	498	369	360	205	154
700	1,278	950	721	578	449	440	235	184
800	1,468	1,090	791	658	529	520	265	214
900	1,658	1,230	861	738	609	600	295	244
1,000	1,848	1,370	931	818	689	680	325	274
1,100	2,038	1,510	1,001	898	769	760	355	304
1,200	2,228	1,650	1,071	978	849	840	385	334
1,300	2,418	1,790	1,141	1,058	929	920	415	364

Mediante este cuadro se puede estimar los caudales potenciales promedios de la bomba sunlight. Estos datos sirven para que los agricultores cuenten con la información de caudales a distintas radiaciones solares usando esta bomba.

Entre más alta sea la carga dinámica total el caudal emitido será menor. El tratamiento 1 × 9 (1 m de altura de succión × 9 m de altura de descarga) obtuvo caudales potenciales más altos, mientras que el tratamiento 3 × 18 (3 m de altura de succión × 18 m de altura de descarga) obtuvo caudales potenciales más bajos (Figura 12).

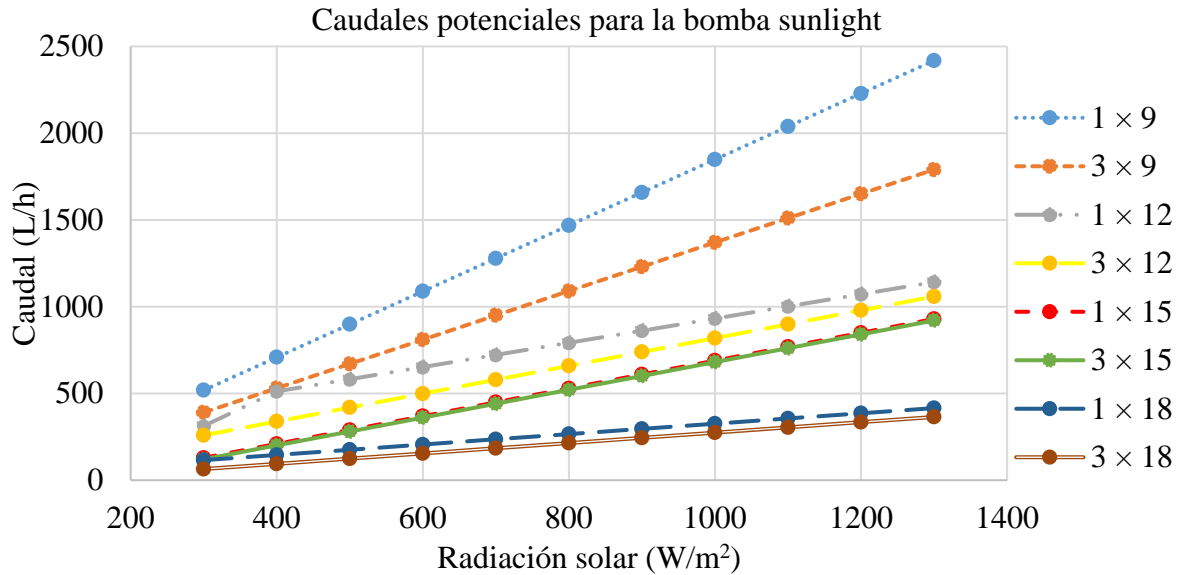


Figura 12. Estimación de caudales potenciales a diferentes alturas dinámicas para la bomba sunlight.

Sunflower.

Coefficiente de correlación. El coeficiente de correlación para los tratamientos de la bomba sunlight se encuentra en un rango de 93-97%. Se consideran altos e indica que hay una relación directa entre radiación solar y caudal emitido (Cuadro 7).

Coefficiente de variación. El coeficiente de variación se mantuvo entre 11-24 % lo que indica que no hay dispersión alta de los datos. Esto difiere con Ávila y Suchini (2015) donde obtuvieron coeficientes de variación de 26-39 % (Cuadro 7).

Cuadro 7. Coeficiente de correlación entre tratamientos para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunflower.

Tratamiento	Altura estática de		Coeficiente de correlación (%)	CV (%)
	succión (m)	descarga (m)		
1 x 3	1	3	96	24
3 x 3	3	3	95	15
1 x 6	1	6	94	17
3 x 6	3	6	97	11
1 x 9	1	9	95	12
3 x 9	3	9	93	15

Modelos de regresión. El coeficiente de determinación e intercepto son constantes que fueron obtenidas por el programa SAS® 9.4 usando la función PROC PEG para cada tratamiento. El siguiente cuadro representa el modelo de regresión de cada tratamiento con su respectivo R² (Cuadro 8).

Cuadro 8. Modelos de regresión lineal de cada tratamiento para la estimación de caudales potenciales de la bomba sunflower.

Tratamiento	Alturas estáticas de		Coeficiente de determinación	Intercepto	Modelo de regresión	R ²
	succión (m)	descarga (m)				
1 × 3	1	3	1.32	-42.8	Q= -42.8 + 1.3 (Rad)	0.93
3 × 3	3	3	0.91	97.1	Q= 97.1 + 0.9 (Rad)	0.95
1 × 6	1	6	1.14	13.3	Q= 13.3 + 1.1 (Rad)	0.87
3 × 6	3	6	1.31	-25.7	Q= -25.7 + 1.0 (Rad)	0.92
1 × 9	1	9	0.65	71.1	Q= 71.1 + 0.6 (Rad)	0.94
3 × 9	3	9	0.63	62.2	Q= 81.8 + 0.6 (Rad)	0.96

Q: caudal; Rad Radiación solar.

Con los modelos obtenidos se pueden proyectar el caudal (variable dependiente) a partir de la radiación (variable independiente).

Estimación de caudales potenciales. Con la fórmula de los modelos de regresión se calculó los caudales potenciales a diferentes radiaciones solares. Se detallan caudales instantáneos promedios en radiaciones de 300-1300 W/m² (Cuadro 9).

Cuadro 9. Caudales potenciales promedios para la bomba sunflower a distintos rangos de radiación solar.

Radiación solar (W/m ²)	Caudal potencial promedio (L/h)					
	Tratamientos					
	1 × 3	3 × 3	1 × 6	3 × 6	1 × 9	3 × 9
300	347	367	343	274	251	242
400	477	457	453	374	311	302
500	607	547	563	474	371	362
600	737	637	673	574	431	422
700	867	727	783	674	491	482
800	997	817	893	774	551	542
900	1,127	907	913	874	611	602
1,000	1,257	997	953	974	671	662
1,100	1,387	1,087	1,047	1,008	731	722
1,200	1,517	1,177	1,141	1,102	791	782
1,300	1,647	1,267	1,235	1,196	851	842

Este cuadro sirve para brindarle al agricultor información sobre caudales potenciales instantáneos y radiación. Mediante estos datos el agricultor puede medir cuanto caudal va a emitir este sistema en relación a la radiación solar.

El caudal emitido es afectado por la carga dinámica total. El tratamiento 1×3 obtuvo caudales potenciales más altos, mientras que el tratamiento 3×9 obtuvo caudales potenciales más bajos (Figura 13).

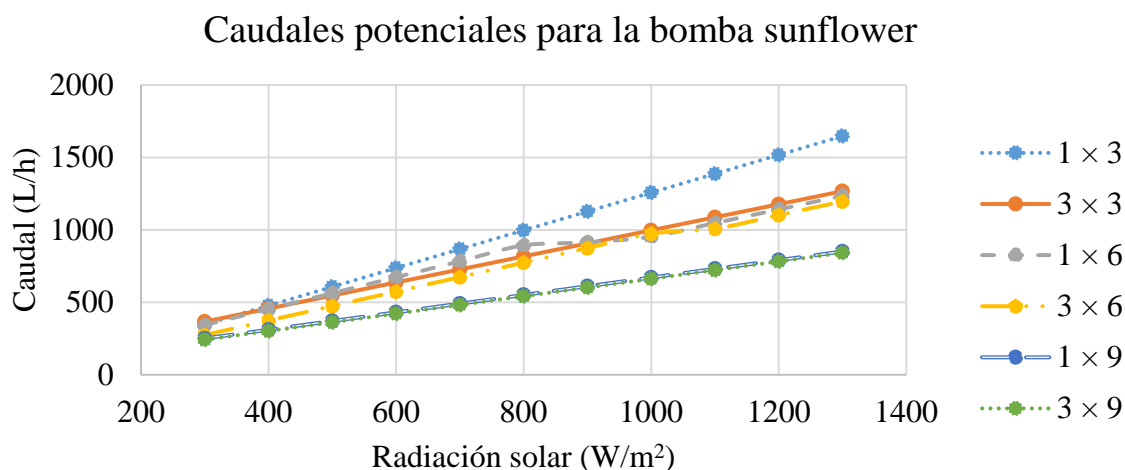


Figura 13. Caudales potenciales de la bomba sunflower a diferentes alturas dinámicas.

4. CONCLUSIONES

- Se determinaron los modelos de regresión lineal que correlacionan caudal y radiación solar para cada sistema de bombeo a diferentes cargas dinámicas totales.
- La carga dinámica total tiene un efecto en el caudal emitido por las bombas, entre más alta es la carga dinámica total, menos es el caudal;
- El sistema de bombeo sunlight produjo caudales que van desde 64 L/h hasta 2,418 L/h, con cargas dinámicas totales de 10 hasta 21 m, respectivamente. El sistema de bombeo sunflower produjo caudales de 242 L/h hasta 1,647 L/h, con cargas dinámicas totales de 4 hasta 12 m, respectivamente.
- El estudio permitió establecer una guía de caudales potenciales promedios a diferentes intensidades de radiación solar y diferentes cargas dinámicas totales para cada sistema de bombeo.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar un ensayo donde se pueda correlacionar la carga dinámica total con la radiación y el caudal para cada sistema de bombeo.
- Realizar un ensayo donde se mida la eficiencia del panel solar, utilizando diferentes potencias y número de paneles en cada sistema de bombeo.

6. LITERATURA CITADA

- Álvarez F, Barahona U, Briseño M. 2012. Manual de riego y drenaje. Programa de manejo integrado de plagas en América Central. Segunda edición. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-Honduras. 115 p.
- Almeida Zambrano M, Elvir Flores A. 2014. Evaluación del rendimiento de dos sistemas solares para bombeo de agua, en el valle del Yeguaré, Honduras [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-Honduras. 20 p.
- Ávila Godoy L, Suchini Osorio O. 2015. Evaluación del rendimiento de dos sistemas de bombeo solar, con tres alturas de descarga [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-Honduras. 31 p.
- Andrade J, Asuaje M. 2010. Introducción a las máquinas hidráulicas: bombas axiales. México: GECOUSB; [consultado 2017 jun 25]. [http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Turbom%C3%A1quinas%20Hidr%C3%A1ulicas%20\(CT3411\)/Material%20Teorico%20\(CT-3411\)/CT-3411%20Clase%2010%20Bombas%20Axiales.pdf](http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Turbom%C3%A1quinas%20Hidr%C3%A1ulicas%20(CT3411)/Material%20Teorico%20(CT-3411)/CT-3411%20Clase%2010%20Bombas%20Axiales.pdf)
- iDE (International Development Enterprise) Honduras. 2016. International Development Enterprise en Honduras. Honduras: iDE global; [consultado 2017 jun 13]. <https://www.ideglobal.org/country/honduras>
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2012. Situación de la seguridad alimentaria en las Américas. Costa Rica: OAS; [consultado 2017 jun 10]. http://www.oas.org/es/sre/dai/sociedad_civil/docs/oea%20seguridad%20alimentaria%20april%2017%202012.pdf
- Martín I, Salcedo R, Font R. 2011. Mecánica de fluidos: impulsión de fluidos. España: RUA; [consultado 2017 jul 23]. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/4/tema2_impulsion.pdf
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Ahorrar para crecer: Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenible: Food & Agriculture Organic. Roma: FAO; [consultado 2017 jul 27]. <http://www.fao.org/docrep/014/i2215s/i2215s.pdf>
- Seyboth K, Eickemeier P, Matschoss P, Hansen G, Kadner S, Schlömer S, Zwickel T, von Stechow C. 2011. Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Estados Unidos: IPCC; [consultado 2017 jul 23]. <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srre-report-es.pdf>

Uzquiano C, Sullivan M, Sandy X. 2015. Capacitación e instalación de sistemas fotovoltaicos en las comunidades de carmen del emero y yolosani. México: Wildlife Conservation Society; [consultado 2017 jul 30]. <http://energiayambienteandina.net/pdf/WCS%20-%20CAPACITACION%20E%20INSTALACION%20DE%20SISTEMAS%20FOTOVOLTAICOS.pdf>

7. ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de caudales potenciales estimados basados en datos de radiación solar de enero del 2017 en la Escuela Agrícola Panamericana para la bomba sunlight.

Hora	Radiación solar (W/m ²)	Caudales por tratamientos (L/h)							
		1×9	3×9	1×12	3×12	1×15	3×15	1×18	3×18
06:00-07:00	49	-380	33	113	-41	-271	183	-98	106
07:00-08:00	178	95	230	297	325	198	400	186	363
08:00-09:00	351	726	492	542	812	823	688	564	704
09:00-10:00	485	1,216	696	732	1,189	1,307	911	857	969
10:00-11:00	667	1,883	972	991	1,703	1,967	1,215	1,256	1,330
11:00-12:00	794	2,349	1,166	1,172	2,062	2,428	1,428	1,535	1,582
12:00-13:00	749	2,183	1,097	1,108	1,934	2,264	1,353	1,436	1,493
13:00-14:00	775	2,279	1,137	1,145	2,008	2,358	1,396	1,493	1,544
14:00-15:00	637	1,772	927	948	1,617	1,857	1,165	1,190	1,270
15:00-16:00	525	1,362	756	789	1,301	1,451	978	944	1,048
16:00-17:00	374	810	527	575	876	906	726	614	750

Anexo 2. Ejemplo de caudales potenciales estimados basados en datos de radiación solar de enero del 2017 en la Escuela Agrícola Panamericana para la bomba sunflower.

Hora	Radiación solar (W/m ²)	Caudales por tratamientos (L/h)					
		1 × 3	3 × 3	1 × 6	3 × 6	1 × 9	3 × 9
06:00-07:00	48	20	141	67	23	100	91
07:00-08:00	178	189	257	209	152	178	169
08:00-09:00	351	413	413	399	325	281	272
09:00-10:00	484	587	533	546	459	362	353
10:00-11:00	666	824	697	746	641	471	462
11:00-12:00	794	989	812	887	768	547	538
12:00-13:00	749	931	771	837	723	520	511
13:00-14:00	775	964	794	865	749	536	527
14:00-15:00	636	784	670	650	611	453	444
15:00-16:00	524	639	569	506	498	385	377
16:00-17:00	373	443	433	364	325	295	286