



ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluation of a Micro Irrigation System Powered by Wind Energy

Evaluación de un sistema de micro irrigación accionado por energía eólica

Dr.C. Oscar Brown-Manrique, M.Sc. Nestor Méndez-Jurjo, M.Sc. Mabel Bernal Espinosa

Universidad de Ciego de Ávila, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Departamento de Ingeniería Civil, Ciego de Ávila, Cuba.

ABSTRACT. The investigation was developed in Modesto Reyes town, road to Moron, km 9,50, Ciego de Ávila city. The results demonstrated that the evapotranspiration of the cultivation reaches the highest values in the months of April - November being August the one with the highest water demand of 72,72 mm week⁻¹. The winds speed average is of 5,22 m s⁻¹; therefore the study area presents a good wind potential that allows the pumping of water in the irrigation systems connected with windmills. The multi shovel windmill evaluated has a flow of design of 25,00 m³ d⁻¹, it produces a power of 261,36 W and it has 15,36 hours of pumping in the day. The micro irrigation with wind energy has a tank of storage of 5000 L that allows fulfilling the water demand of the cultivation for the irrigation area established with a grade of satisfaction of 113%.

Keywords: Pumping, flow, renewable energy.

RESUMEN. La investigación se desarrolló en la localidad, Modesto Reyes localizado en la carretera a Morón, en el km 9,50 de la Ciudad de Ciego de Ávila. Los resultados demostraron que la evapotranspiración del cultivo alcanza los valores más elevados en los meses desde abril hasta noviembre siendo el de mayor demanda hídrica agosto con 72,72 mm semana⁻¹. La velocidad promedio de los vientos es de 5,22 m s⁻¹; por lo que la zona de estudio presenta un buen potencial eólico que permite el bombeo de agua en los sistemas de riego conectados con molinos de viento. El molino multipala evaluado tiene un caudal de diseño de 25,00 m³ d⁻¹, produce una potencia de 261,36 W y dispone de 15,36 horas de bombeo en el día. El sistema de riego por micro irrigación con accionamiento eólico cuenta con un tanque de almacenamiento de 5000 L que permite cumplir con la demanda hídrica del cultivo para el área de riego establecida con un grado de satisfacción de 113%.

Palabras clave: Bombeo, caudal, energía renovable.

INTRODUCTION

Located irrigation systems contribute to improve the efficiency of the water management because the relatively small doses multiply the production; but it is evident the necessity to perfect the design and management so that bigger profitability is achieved (Rogerio *et al.*, 2015).

The design of a micro irrigation system begins with the determination of the flow rate and the number of necessary emitters to humidify a certain soil volume. For that purpose, it is necessary previously estimating the forms and dimensions of the humid bulb depending on the properties and physical characteristics of the soil, the volume and inflow rate applied by emitter and the land topography (Mujica *et al.*, 2012).

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego localizados contribuyen al mejoramiento de la eficiencia del manejo del agua; debido a que las dosis relativamente pequeñas multiplican la producción; pero es evidente la necesidad de perfeccionar el diseño y manejo para que se logre mayor rentabilidad (Rogério *et al.*, 2015).

El diseño de un sistema de micro irrigación comienza con la determinación del caudal y el número de emisores necesarios para humedecer un determinado volumen de suelo, siendo necesario la estimación previa de la forma y dimensiones del bulbo húmedo en dependencia de las propiedades y características físicas del suelo, del volumen, caudal de agua aplicado por el emisor y de la topografía del terreno (Mujica *et al.*, 2012).

Located irrigation of high frequency has demonstrated to be an irrigation method adapted by their particularity of being able to maintain in the soil high water potential, in located form (Rodríguez-García & Martínez-Varona, 2017) and it adapts to small land areas and to renewable energy. This characteristic is of great importance, because now the economic importance of the systems that use these energies grows (Besnier, 1980).

Wind energy is among the most dynamic energies today and is at the forefront of renewable energies (Avila-Prats *et al.*, 2010). In this sense, American continent can become the world's leading wind region by the capacity that is emerging, fundamentally in Brazil (Regueiro & Chavez, 2014).

Due to the successes obtained in short time, in wind energy, Cuba is recognized as a developing country that works seriously in the introduction of renewable sources of energy, and particularly, wind energy. It is very important, because the World Association of Eolic Energy is conscious of the necessity of implementing government policies for the promotion of this source of renewable energy (Moreno, 2008). In this sense, the objective of this work is to evaluate a micro irrigation system powered by wind energy to achieve the rational use of water and conventional energy.

METHODS

The investigation was carried out in Modesto Reyes Community, belonging to the Municipality of Ciego de Ávila in the period comprehended from September 2013 to July 2015 in a surface of 3000 m² (0,30 ha) dedicated to cultivations of vegetables under organoponic conditions. The source of water comes from a well located to 2 m of the plot and the soil of the experimental area is Typical Red Ferrallitic, which is correlated in the IUSS Working Group WRB (2007) with the order Ferralsoles, according to the current classification of the Cuban soils.

The reference evapotranspiration (ET_0) was calculated by the method of Penman Monteith (Allen *et al.*, 2006) with climatological data of the Institute of Meteorology of Ciego de Ávila Province for the years 1983-2013. Cultivation evapotranspiration was determined (ET_c) according to suggestions of Ferreyra *et al.* (2000) and Rogerio *et al.* (2015).

The total necessities of water were calculated from crop evapotranspiration, which was corrected by means of the percolation losses, coefficient of uniformity of the irrigation installation and the necessity of water for lixiviation of salts. The following equations were used.

$$N_t = \frac{ET_c(1 + E_{ls})}{E_t} ac \quad (1)$$

$$E_{ls} = \frac{CE_a}{2CE_{es}} \quad (2)$$

$$E_t = E_{pp} \cdot CU \quad (3)$$

El riego localizado de alta frecuencia ha demostrado ser un método de riego adecuado por su particularidad de lograr mantener en el suelo altos potenciales hídricos, en forma localizada (Rodríguez-García y Martínez-Varona, 2017) y se adapta a las pequeñas áreas de terreno y a las energías renovables. Esta característica es de gran importancia, debido a que en la actualidad crece la importancia económica de los sistemas que utilizan estas energías (Besnier, 1980).

La energía eólica se encuentra entre las energías con mayor crecimiento dinámico en la actualidad y se sitúa a la vanguardia de las energías renovables (Avila-Prats *et al.*, 2010). En este sentido, el continente americano puede convertirse en la región eólica mundial de referencia por la capacidad que está aflorando, fundamentalmente en Brasil (Regueiro y Chavez, 2014).

Cuba por los logros que ha obtenido en corto tiempo en la energía eólica es reconocida como un país en desarrollo que trabaja seriamente en la introducción de fuentes renovables de energías, y en particular la eólica; esto es muy importante, porque la Asociación Mundial de Energía Eólica es consciente de la necesidad de implementar políticas gubernamentales para la promoción de esta fuente renovable de energía (Moreno, 2008). En este sentido el objetivo del trabajo consiste en evaluar un sistema de micro irrigación accionado por energía eólica para que se logre el aprovechamiento racional del agua y la energía convencional.

MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la comunidad de Modesto Reyes, perteneciente al Municipio de Ciego de Ávila en el periodo comprendido desde septiembre del 2013 a julio del 2015 en una superficie de 3000 m² (0,30 ha) destinada para cultivos de hortalizas en condiciones de organopónico. La fuente de agua proviene de un pozo ubicado a dos metros de la parcela y el suelo del área experimental es del tipo Ferralítico Rojo Típico el cual se correlaciona en la IUSS Working Group WRB (2007), con el orden Ferralsoles según la actual clasificación de los suelos de Cuba.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se calculó mediante el método de Penman Monteith (Allen *et al.*, 2006) con datos climatológicos del Instituto de Meteorología de la provincia Ciego de Ávila para los años 1983-2013; luego se determinó la evapotranspiración del cultivo (ET_c) según sugerencias de Ferreyra *et al.* (2000) y Rogério *et al.* (2015).

Las necesidades de agua totales se calcularon a partir de la evapotranspiración del cultivo, la cual se corrigió teniéndose en cuenta las pérdidas por percolación, el coeficiente de uniformidad de la instalación de riego y la necesidad de agua para lixivación de sales. Se utilizaron las ecuaciones siguientes.

$$N_t = \frac{ET_c(1 + E_{ls})}{E_t} ac \quad (1)$$

$$E_{ls} = \frac{CE_a}{2CE_{es}} \quad (2)$$

$$E_t = E_{pp} \cdot CU \quad (3)$$

Where:

N_t is total necessities of water (mm-week⁻¹);
 E_{ls} is efficiency from necessity of salt washing;
 E_t is the total efficiency of the system;
 CE_a is the electric conductivity of the irrigation water (dS·m⁻¹);
 CE_{es} is the conductivity of the extract of saturation of the soil corresponding to a 10% decreasing of production depending on the crop (dS·m⁻¹);
 E_{pp} is the efficiency for percolation losses;
 CU is the coefficient of uniformity.

Percolation efficiency (E_{pp}) was considered from the tables shown by Pacheco *et al.* (2007) for different types of soils. Coefficient of uniformity of irrigation installation (CU) was assumed similar to 0,90 according Fontova y Garcia (2001) and the values of CE_{es} for the calculation of washing necessities were assumed according to tabulated values offered by Allen *et al.* (2006).

The percentage of humidified soil (Psh) was considered from the tables presented by Keller y Bliesner (1990) and the diameter of humid bulb for the following equation developed by Cruz-Bautista *et al.* (2015):

$$D_{bh} = 0,14 \cdot V^{0,353} K_s^{-0,110} \cdot \theta^{-0,387} \quad (4)$$

Where:

D_{bh} is the diameter of humid bulb (m);
 V is the volume of applied water (m³);
 K_s is the saturated hydraulic conductivity (m·s⁻¹);
 θ is the initial humidity content of the soil (m³·m⁻³).

The number of emitters per plant was obtained by the application in sequence of the following equations:

$$N_e = \frac{A_{mp} \cdot P_{sh}}{A_e \cdot 100} \quad (5)$$

$$A_e = \frac{\pi \cdot D_{bh}^2}{4} \quad (6)$$

Where:

N_e is the number of emitters per plant;
 A_{mp} is the area of the plantation frame (m²);
 P_{sh} is the percentage of humidified soil (%);
 A_e is the emitter-wet area (m²).

The irrigation time was determined from the relationship between the practical dose of irrigation and the irrigation flow. This last one depends directly on the number of emitters per square meters, the emitter flow and the spacing between emitters and laterals, respectively. The applied equations were the following:

$$T_r = \frac{D_p \cdot A_s}{Q \cdot 1000} \quad (7)$$

$$D_p = N_t \cdot d \quad (8)$$

$$d = 7 - I_r \quad (9)$$

donde:

N_t - necesidades de agua totales (mm·semana⁻¹);
 E_{ls} -eficiencia por necesidad de lavado de sales;
 E_t -eficiencia total del sistema;
 CE_a -conductividad eléctrica del agua de riego (dS·m⁻¹);
 CE_{es} -conductividad del extracto de saturación del suelo correspondiente a una disminución de producción del 10% en dependencia del cultivo (dS·m⁻¹);
 E_{pp} -eficiencia por pérdidas debido a la percolación;
 CU -coeficiente de uniformidad.

La eficiencia por pérdidas debido a la percolación (E_{pp}) se consideró a partir de las tablas mostradas por Pacheco *et al.* (2007), para diferentes tipos de suelos, el coeficiente de uniformidad de la instalación de riego (CU) se asumió igual a 0,90 según Fontova y García (2001), y los valores de CE_{es} para el cálculo de las necesidades de lavado se asumieron según valores tabulados ofrecidos por Allen *et al.* (2006).

El porcentaje de suelo humedecido (Psh) se estimó a partir de las tablas presentadas por Keller y Bliesner (1990), y el diámetro del bulbo húmedo por la siguiente ecuación desarrollada por Cruz-Bautista *et al.* (2015):

$$D_{bh} = 0,14 \cdot V^{0,353} K_s^{-0,110} \cdot \theta^{-0,387} \quad (4)$$

donde:

D_{bh} - diámetro del bulbo húmedo (m);
 V -volumen de agua aplicada (m³);
 K_s -conductividad hidráulica saturada (m·s⁻¹);
 θ -contenido de humedad inicial del suelo (m³·m⁻³).

El número de emisores por plantas se obtuvo de la aplicación en secuencia de las siguientes ecuaciones:

$$N_e = \frac{A_{mp} \cdot P_{sh}}{A_e \cdot 100} \quad (5)$$

$$A_e = \frac{\pi \cdot D_{bh}^2}{4} \quad (6)$$

donde:

N_e - número de emisores por planta;
 A_{mp} -área del marco de plantación (m²);
 P_{sh} -porcentaje de suelo humedecido (%);
 A_e -área mojada por el emisor (m²).

El tiempo de riego se determinó a partir de la relación entre la dosis práctica de riego y el caudal de riego. Este último depende directamente del número de emisores por metros cuadrados, el caudal del emisor y los espaciamientos entre emisores y laterales respectivamente. Las fórmulas aplicadas fueron las siguientes:

$$T_r = \frac{D_p \cdot A_s}{Q \cdot 1000} \quad (7)$$

$$D_p = N_t \cdot d \quad (8)$$

$$d = 7 - I_r \quad (9)$$

$$Q_r = q_e \cdot N_e \cdot N_p \tag{10}$$

$$N_p = \left(\frac{A_s}{A_{mp}} \right) \tag{11}$$

$$V_s = N_t \cdot A_{mp} \cdot N_p \tag{12}$$

Where:

- D_p is the practical dose of irrigation (mm);
- N_t is the total necessities of water (mm·day⁻¹);
- d is the number of irrigation days in the week (day);
- I_r is the irrigation interval (day);
- Q_r is the irrigation flow (L·h⁻¹);
- q_e is the emitter flow (L·h⁻¹);
- N_e is the number of emitters per plant (emitters·plant⁻¹);
- A_s is the cultivation area assisted by the system (m²);
- T_r is the irrigation time (h);
- V_s is the system volume under design conditions (L).

The grade of satisfaction of water requirements of the system was determined from the relationship between the storage volume in the tank and the volume of the irrigation system; due to that it was necessary the use of the equations that are shown next:

$$G_s = \frac{V_T}{V_s} 100 \tag{13}$$

$$V_s = V_l \cdot N_l \tag{14}$$

$$V_l = q_l \cdot T_r \tag{15}$$

Where:

- G_s is the grade of satisfaction of water requirements of the system (%);
- V_T is the storage volume in the tank in the irrigation interval (L);
- V_s is the real volume of the irrigation system (L);
- V_l is the lateral volume (L);
- N_l is the number of lateral that work simultaneously;
- q_l is the lateral flow (L·h⁻¹).

Descriptive analysis to the wind speed series that represents the monthly speeds per hour was carried out corresponding to the period 1983-2013 (Table 1). The Microsoft Office Excel version 2013 was used as a tool for its required accuracy for this type of study and easy use for the user. Later on a dispersion graph was built, being represented in the axis of the ordinates the speed of the wind in m s⁻¹ and in the axis of the abscissas the time in hours.

$$Q_r = q_e \cdot N_e \cdot N_p \tag{10}$$

$$N_p = \left(\frac{A_s}{A_{mp}} \right) \tag{11}$$

$$V_s = N_t \cdot A_{mp} \cdot N_p \tag{12}$$

donde:

- D_p - dosis práctica de riego (mm);
- N_t -necesidades de agua totales (mm·día⁻¹);
- d -número de días de riego en la semana (día);
- I_r -intervalo de riego (día);
- Q_r -caudal de riego (L·h⁻¹);
- q_e -caudal del emisor (L·h⁻¹);
- N_e -número de emisores por plantas (emisores·plantas⁻¹);
- A_s -área de siembra atendida por el sistema (m²);
- T_r -tiempo de riego (h);
- V_s -volumen del sistema en condiciones de diseño (L).

El grado de satisfacción de los requerimientos hídricos del sistema se determinó a partir de la relación entre el volumen de almacenamiento en el tanque y el volumen del sistema de riego; por lo que fue necesaria la utilización de las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$G_s = \frac{V_T}{V_s} 100 \tag{13}$$

$$V_s = V_l \cdot N_l \tag{14}$$

$$V_l = q_l \cdot T_r \tag{15}$$

donde:

- G_s - grado de satisfacción de los requerimientos hídricos del sistema (%);
- V_T -volumen de almacenamiento en el tanque en el intervalo de riego (L);
- V_s -volumen real del sistema de riego (L);
- V_l -volumen del lateral (L);
- N_l -número de laterales que trabajan de forma simultánea;
- q_l -caudal del lateral (L·h⁻¹).

Se realizó el análisis descriptivo a la serie de velocidad del viento que representa las velocidades horarias mensuales correspondientes al periodo 1983-2013 (Tabla 1). Se empleó el Microsoft Office Excel, versión 2013 por tratarse de una herramienta con la exactitud requerida para este tipo de estudio y ser de fácil utilización por el usuario; posteriormente se construyó un gráfico de dispersión, representándose en el eje de las ordenadas la velocidad del viento en m·s⁻¹ y en el eje de las abscisas el tiempo en horas.

TABLE 1. Series of Wind Speed

TABLA 1. Serie de velocidad del viento

Time(h)	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.
1	2,5	2,7	3,1	4,1	3,9	4,4	4,6	4,6	2,5	4,6	4,5	3,8
2	2,3	2,5	3,1	4,0	3,8	4,1	4,5	4,3	2,5	4,3	4,4	3,6
3	2,2	2,4	3,0	3,9	3,6	3,8	4,3	4,3	2,5	4,3	4,0	3,5
4	2,0	2,3	2,9	3,8	3,5	3,8	4,0	3,9	2,2	3,9	4,0	3,3

Time(h)	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.
5	1,9	2,2	2,9	3,9	3,5	3,7	3,8	3,7	2,0	3,7	3,9	3,2
6	1,7	2,1	3,2	3,8	3,6	3,7	3,7	3,7	2,0	3,7	3,5	3,2
7	1,6	2,1	3,3	3,7	3,4	3,2	3,8	3,7	1,8	3,7	3,3	3,0
8	1,6	2,7	3,6	3,7	3,5	3,7	4,1	4,0	1,8	4,0	3,5	3,3
9	1,6	2,4	3,5	3,7	3,6	4,0	4,0	4,3	2,0	4,3	4,0	3,4
10	2,0	2,3	3,7	3,7	4,0	4,5	4,0	4,2	2,1	4,2	4,0	3,5
11	2,2	2,4	4,3	3,9	4,1	4,6	4,5	4,7	2,4	4,7	4,3	3,8
12	2,4	2,7	4,4	4,2	4,1	4,8	4,6	5,0	2,4	5,0	5,0	4,1
13	2,9	3,2	4,4	4,5	4,3	5,3	5,1	5,0	2,8	5,0	5,2	4,3
14	2,9	3,4	4,7	4,8	4,4	5,7	5,3	5,3	3,2	5,3	5,6	4,6
15	3,3	3,5	4,6	5,2	4,5	6,0	5,5	6,1	3,3	6,1	6,2	4,9
16	3,0	3,6	4,7	5,0	4,9	6,0	5,9	6,0	3,4	6,0	6,6	5,0
17	3,3	3,8	4,6	5,3	5,3	6,5	6,1	6,1	3,5	6,1	6,6	5,2
18	3,0	4,1	4,5	5,2	5,6	6,2	6,3	5,9	3,4	5,9	6,6	5,2
19	3,6	4,1	3,8	5,1	5,3	6,0	6,2	6,2	3,3	6,2	6,2	5,1
20	3,5	3,7	4,0	5,3	5,5	5,8	6,1	6,2	3,2	6,2	6,1	5,1
21	3,3	3,5	4,0	5,0	5,2	5,5	5,4	5,8	2,9	5,8	6,0	4,8
22	3,1	3,4	3,6	4,7	4,6	5,3	5,2	5,6	2,9	5,6	5,7	4,5
23	3,0	3,1	3,6	4,6	4,2	5,0	4,9	5,4	2,6	5,4	5,4	4,3
24	2,8	3,1	3,5	4,7	3,9	4,9	4,4	5,3	2,6	5,3	4,8	4,1

The average wind speed (v_m) was calculated as the summation quotient of product of the absolute frequency (F_a) and wind speed (v) divided by the total of observations (N). Also it was considered the probability of winds speed $p(v)$ from the established intervals as it is expressed in the following equations:

$$v_m = \frac{\sum F_a \cdot v}{N} \tag{16}$$

$$p(v) = \frac{F_a}{N} \tag{17}$$

In the evaluation of wind pumping system, the methodology suggested by Moreno (2012) was used for estimating the available wind power and the hydraulic energy required in a multishovel windmill with a rotor type horizontal axis to windward of 3,5 m of diameter. It is formed by 32 shovels, maximum rotation speed of 60 rpm, angular speed of 12,56 rad s⁻¹, sensibility of 2 m s⁻¹ from which the rotor remains to windward to the wind direction. The mill uses a positive displacement bomb of simple effect with a nominal diameter of 75 mm, displacement piston of 70 m, cylinder total length of 300 mm and volumetric efficiency of 90%. The equations used were:

$$N_v = \frac{1}{2} \rho_{aire} \cdot A_r \cdot v^3 \tag{18}$$

$$E_h = \rho_{agua} \cdot g \cdot Q \cdot H \tag{19}$$

Where:

N_v is the wind power (W);

ρ_{aire} is the air density (kg·m⁻³);

ρ_{agua} is the water density (kg·m⁻³);

A_r is the rotor area (m²);

La velocidad promedio del viento (v_m) se calculó como el cociente de la sumatoria del producto de la frecuencia absoluta (F_a) y la velocidad del viento (v) entre el total de observaciones (N). También se estimó la probabilidad de la velocidad de los vientos, $p(v)$ a partir de los intervalos establecidos según se expresa en las ecuaciones siguientes:

$$v_m = \frac{\sum F_a \cdot v}{N} \tag{16}$$

$$p(v) = \frac{F_a}{N} \tag{17}$$

En la evaluación del sistema de bombeo eólico se empleó la metodología sugerida por Moreno (2012), para la estimación de la potencia eólica disponible y la energía hidráulica requerida en un molino multipala con un rotor tipo eje horizontal a barlovento de 3,5 m diámetro formado por 32 aspas, velocidad de rotación máxima de 60 rpm, velocidad angular de 12,56 rad s⁻¹, sensibilidad de 2 m s⁻¹ a partir de la cual el rotor permanece a barlovento a la dirección del viento. El molino utiliza una bomba de desplazamiento positivo recíprocante de simple efecto con un diámetro nominal de 75 mm, desplazamiento de émbolo de 70 m, longitud total de la camisa de 300 mm y eficiencia volumétrica de 90%. Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$N_v = \frac{1}{2} \rho_{aire} \cdot A_r \cdot v^3 \tag{18}$$

$$E_h = \rho_{agua} \cdot g \cdot Q \cdot H \tag{19}$$

donde:

N_v es la potencia del viento (W);

ρ_{aire} la densidad del aire (kg·m⁻³);

ρ_{agua} la densidad del agua (kg·m⁻³);

A_r el área del rotor (m²);

v is the average wind speed ($m \cdot s^{-1}$);
 E_h is the required hydraulic energy ($m^4 \cdot day^{-1}$);
 g is the constant of gravity ($m \cdot s^{-2}$);
 Q is the necessary water flow ($m^3 \cdot day^{-1}$);
 H is the pumping height, included the suction hydraulic lost and the discharge (m).

v la velocidad promedio del viento ($m \cdot s^{-1}$);
 E_h la energía hidráulica requerida ($m^4 \cdot día^{-1}$);
 g la constante de gravedad ($m \cdot s^{-2}$);
 Q el caudal de agua necesario ($m^3 \cdot día^{-1}$);
 H la altura de bombeo, incluidas las pérdidas hidráulicas en la succión y la descarga (m).

RESULTS AND DISCUSSION

In Figure 1 it is presented the behavior of reference evapotranspiration (ET_o) and crop evapotranspiration of cabbage (ET_c) that was the one with the highest water demand in the organoponic. The months of April, May, June, July, August, September, October and November presented the highest values. The peak month was August with $72,72 \text{ mm week}^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración del cultivo de la col (ET_c) que resultó ser el de mayor demanda hídrica en el organopónico. Se observó que los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre presentaron los valores más elevados. El mes pico fue agosto con $72,72 \text{ mm semana}^{-1}$.

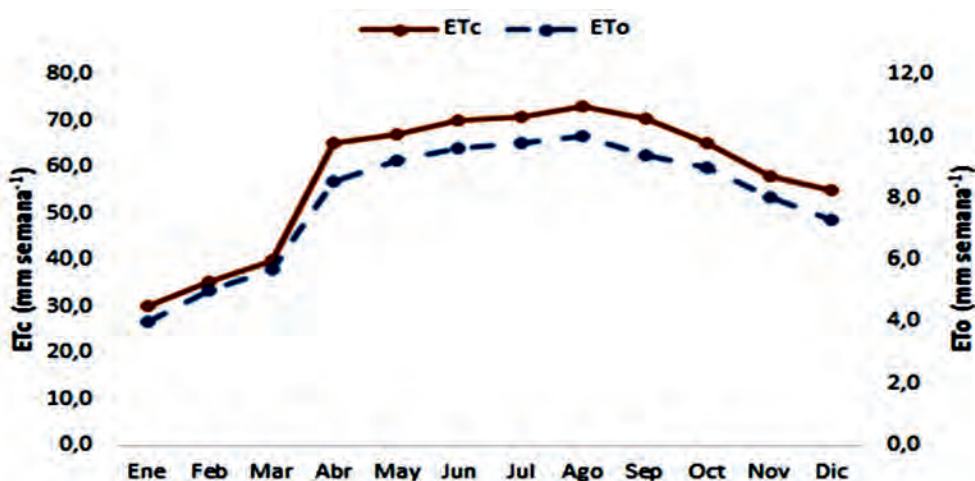


FIGURE 1. Curves of Reference Evapotranspiration and of the Crop.
 FIGURA 1. Curva de la evapotranspiración de referencia y del cultivo.

Fundamental parameters of emitter Oz-Line 135 were the flow of $2.50 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ for a pressure of 10 m. That indicates that small volumes of water are applied, which is favorable to the micro irrigation systems that use renewable energy. The calculation of coefficient and exponent of emitter discharge gave the result of 0.764 and 0.515, respectively.

Los parámetros fundamentales del emisor Oz-Line 135 fueron el caudal de $2,50 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ para una presión de 10 m el cual indica que se aplican pequeños volúmenes de agua que es favorable a los sistemas de riego por micro irrigación que utilizan energías renovables. El cálculo del coeficiente y el exponente de descarga del emisor dieron el resultado de 0,764 y 0,515 respectivamente.

In Table 2, the different spacing related with cultivation, lateral and irrigation system are shown. The flow required by the system is $31.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and the irrigation time is 3.87 h; however, as the area is divided in six sectors these parameters decrease to values of $5.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and 0.65 h (38.70 min.) that represents a volume of 3386.3 m^3 for subunit.

En la Tabla 2 se exponen los diferentes espaciamientos relacionados con el cultivo, el lateral y el sistema de riego. Se observa que el caudal requerido por el sistema es de $31,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y el tiempo de riego de 3,87 h; sin embargo, como el área está dividida en seis sectores estos parámetros se reducen a valores de $5,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y 0,65 h (38,70 min.) lo que representa un volumen de $3386,3 \text{ m}^3$ por subunidad.

TABLE 2. Agronomic Parameters of Irrigation System
 TABLA. 2. Parámetros agronómicos y del sistema de riego

Parameter	Value	Parameter	Value
Spacing between plants, E_p (m)	0.30	Area of plantation frame, A_{mp} (m^2)	0.24
Spacing between arrays, E_h (m)	0.85	Diameter of humid bulb, D_{bh} (m)	0.47
Spacing between emitters, E_e (m)	0.70	Emitter wet area, A_e (m^2)	0.17
Spacing between lateral, E_l (m)	0.85	Number of emitters per square meter, NE	1.00
Depth of roots system, P_r (m)	0.30	Efficiency for salts washing, E_{ls}	1.16
Percentage of humidified soil, P_{sh} (%)	100.00	Total necessities of water, N_t (mm semana ⁻¹)	94.08

Parameter	Value	Parameter	Value
Electric conductivity of irrigation water, CE_a (dS m ⁻¹)	0.93	Practical irrigation dose, D_p (mm)	40.32
Electric conductivity of saturation extract, CE_{es} (dS m ⁻¹)	2.80	Required flow, Q_r (m ³ h ⁻¹)	31.25
Total efficiency of system, E_t	0.90	Irrigation time, T_r (h)	3.87

In Table 3, the main statistics of descriptive analysis of the wind speed series are exposed. The smallest averages monthly speeds are in the months of September, October and May with values between 2.56 and 2.64 m·s⁻¹; but they are increased in the remaining months above the 4.00 m·s⁻¹. This behavior confirms the criterion of Montesinos & Moreno (2013) in relationship that in Cuba and the Caribbean islands, the eolic energy constitutes an alternative to integrate it to the energy structure.

En la Tabla 3 se exponen los principales estadígrafos del análisis descriptivo de la serie de velocidad del viento. Se observa que las menores velocidades promedios mensuales se encuentran en los meses de septiembre, octubre y mayo con valores comprendidos entre 2,56 y 2,64 m·s⁻¹; pero se incrementan en los meses restantes por encima de los 4,00 m·s⁻¹. Este comportamiento confirma el criterio de Montesinos y Moreno (2013), en relación de que en Cuba y en las islas del Caribe, la energía eólica constituye una alternativa para integrarla a la estructura energética.

TABLE 3. Descriptive Analysis of Wind Speed Series in m·s⁻¹
 TABLA 3. Análisis descriptivo de la serie de velocidad del viento en m·s⁻¹

Statistics	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Mean
Average	2.56	2.97	3.80	4.40	4.28	4.85	4.87	4.96	2.64	4.96	4.98	4.12	4.11
Typical error	0.14	0.14	0.13	0.13	0.15	0.21	0.18	0.19	0.12	0.19	0.23	0.16	0.16
Median	2.50	2.70	3.70	4.20	4.10	4.80	4.60	5.00	2.50	5.00	5.00	4.10	4.02
Mode	1.60	2.70	3.60	3.70	3.60	3.70	4.00	4.30	2.50	4.30	4.00	3.80	3.48
Standard deviation	0.66	0.66	0.62	0.61	0.71	0.99	0.86	0.90	0.56	0.90	1.12	0.76	0.78
Variance	0.44	0.44	0.39	0.37	0.51	0.98	0.74	0.82	0.31	0.82	1.25	0.57	0.64
Kurtosis	-1.40	-1.35	-1.42	-1.65	-0.99	-1.37	-1.24	-1.54	-1.35	-1.54	-1.50	-1.56	-1.41
Asymmetry Coefficient	-0.07	0.28	0.05	0.26	0.56	0.04	0.32	0.03	0.07	0.03	0.09	0.12	0.15

In Figure 2 it is indicated that the highest values of wind speed are between 17 and 18 hours; while in Table 4 it is observed that the biggest probabilities of winds speed happen between 2.00 and 8.00 m·s⁻¹, reaching their maximum value between 2.00 and 3.00 m·s⁻¹. The average wind speed is 5.22 m·s⁻¹, which is appropriate for the mill operation.

En la Figura 2 se observa que los valores más elevados de velocidad del viento se encuentran entre las 17 y 18 horas; mientras que en la Tabla 4 se observa que las mayores probabilidades de la velocidad de los vientos ocurren entre los 2,00 y 8,00 m·s⁻¹, alcanzando su máximo valor entre los 2,00 y 3,00 m·s⁻¹. La velocidad promedio del viento es de 5,22 m·s⁻¹, la cual es apropiada para el funcionamiento del molino.

The data of speed (v) and probability, $p(v)$ were adjusted appropriately to a polynomial equation of second order with a high coefficient of determination of 0,9118; for what it can be used for estimating the average wind power:

Los datos de velocidad (v) y probabilidad, $p(v)$ se ajustaron adecuadamente a una ecuación polinómica de segundo orden con un coeficiente de determinación elevado de 0,9118; por lo que puede ser utilizada para la estimación de la potencia media del viento:

$$p(v) = -0.0011v^2 + 0.0017v + 0.1428$$

$$R^2 = 0.9118 \tag{20}$$

$$p(v) = -0.0011v^2 + 0.0017v + 0.1428$$

$$R^2 = 0.9118 \tag{20}$$

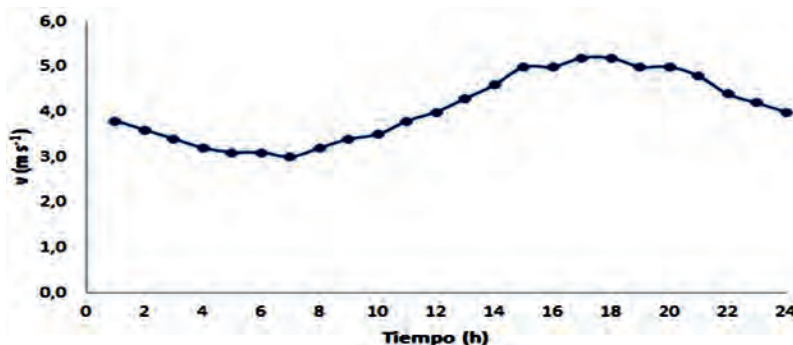


FIGURE 2. Curve of Wind Speed in Function of Time.
 FIGURA 2. Curva de velocidad del viento en función del tiempo.

TABLE 4 Frequency Analysis of the Winds
TABLA 4 Análisis frecuencial de los vientos

Interval	v (m s ⁻¹)	F_a	$v.F_a$ (m s ⁻¹)	$p(v)$
0-1	1	203	203	0.0284
1-2	2	758	1516	0.1061
2-3	3	1358	4074	0.1901
3-4	4	843	3372	0.1180
4-5	5	827	4135	0.1157
5-6	6	854	5124	0.1195
6-7	7	897	6279	0.1255
7-8	8	574	4592	0.0803
8-9	9	454	4086	0.0635
9-10	10	287	2870	0.0004
10-11	11	66	726	0.0092
11-12	12	23	276	0.0032
12-13	13	1	13	0.0001
Σ		7145	37266	100

The main results of evaluation of multi shovel windmill indicate that there are 15.36 h of pumping a day, that together to their design flow of 25.00 m³·d⁻¹ (25000 L), allows the storage of a potential water volume of 16250 m³. But there is a tank in elevation of 5000.00 L for the daily storage, which guarantees irrigation of two sub unit every day and a volume of 20000.00 L every 4 days. The windmill develops a power of 261.36 W and a hydraulic energy of 264.00 m⁴·d⁻¹.

The evaluation of irrigation system allowed checking that irrigation area has 48 lateral with a longitude of 22.3 m and 32 emitters for lateral. Each lateral gives a flow of 80.0 L·h⁻¹ and a volume of 52.0 L. The system also contributes every day a total volume of 4440.0 L, which represents 17760.0 L in four irrigation days.

These results demonstrate that cultivation water demand is completed, being achieved under the current conditions of organoponic unit, 113% of satisfaction of water requirements. There is a reservation left of 13% that can be used in case wind speed is below of 2.00 m·s⁻¹ or to irrigate an adjacent area to the organoponic with the purpose of increasing survival of unirrigated cultivations that are usually cultivated in that space.

The high satisfaction found in this irrigation system is similar to the one found by Rogério *et al.* (2015) in studies carried out in the Republic of Angola in a drip irrigation system for tomato cultivation worked with renewable energy.

CONCLUSIONS

- The cultivation evapotranspiration reaches the highest values in the months of April, May, June, July, August, September, October and November, being August the one that presented highest water demand with 72.72 mm week⁻¹.
- The average winds speed is of 5.22 m s⁻¹; because of that the studied area presents a good eolic potential that allows water pumping in the irrigation systems connected with wind mills.
- The multi shovel windmill evaluated has a design flow of 25.00 m³ d⁻¹, it produces a power of 261.36 W and it has 15.36 hours of pumping a day.

Los principales resultados de la evaluación del molino multipala indican que se dispone de 15,36 h de bombeo en el día, que unido a su caudal de diseño de 25,00 m³ d⁻¹ (25000 L), permite el almacenamiento de volumen de agua potencial de 16250 m³; pero se dispone de un tanque elevado de 5000,00 L para el almacenamiento diario, el cual garantiza el riego de dos subunidades cada día y un volumen de 20000,00 L cada 4 días de riego. El molino desarrolla una potencia de 261,36 W y una energía hidráulica de 264,00 m⁴·d⁻¹.

La evaluación del sistema de riego permitió comprobar que el área de riego dispone de 48 laterales con una longitud de 22,3 m y 32 emisores por lateral. Cada lateral suministra un caudal de 80,0 L·h⁻¹ y un volumen de 52,0 L; por su parte el sistema aporta un volumen total de 4440,0 L en cada día, lo que representa 17760,0 L en cuatro días de riego.

Estos resultados demuestran que se cumple la demanda de agua del cultivo al lograrse en las condiciones actuales de la unidad organopónica un 113% de satisfacción de los requerimientos hídricos; quedando una reserva de 13% que puede emplearse en caso de que el viento este por debajo de los 2,00 m·s⁻¹ o para regar un área aledaña al organopónico con el propósito de incrementar la supervivencia de los cultivos de secano que suelen cultivarse en ese espacio.

El grado de satisfacción elevado encontrado en este sistema de riego es similar al encontrado por Rogério *et al.* (2015), en estudios realizados en la Republica de Angola en un sistema de riego por goteo para el cultivo del tomate accionado con energía renovable.

CONCLUSIONES

- La evapotranspiración del cultivo alcanza los valores más elevados en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre siendo agosto el de mayor demanda hídrica con 72,72 mm·semana⁻¹.
- La velocidad promedio de los vientos es de 5,22 m·s⁻¹; por lo que la zona de estudio presenta un buen potencial eólico que permite el bombeo de agua en los sistemas de riego conectados con molinos de viento.
- El molino multipala evaluado tiene un caudal de diseño de 25,00 m³·d⁻¹, produce una potencia de 261,36 W y dispone de 15,36 horas de bombeo en el día.

- The micro irrigation system with wind power has a storage tank of 5000 L for a real volume system of 4440 L. That allows fulfilling the water demand of cultivation for the irrigation area established with a satisfaction grade of 113% and also having a reservation of water for times of little wind to guarantee the survival of unirrigated land cultivations that are cultivated bordering to organoponic area.
- El sistema de riego por micro irrigación con accionamiento eólico cuenta con un tanque de almacenamiento de 5000 L para un volumen real del sistema de 4440 L que permite cumplir con la demanda hídrica del cultivo para el área de riego establecida con un grado de satisfacción de 113% y contar además con una reserva de agua para tiempos de poco viento y garantizar la supervivencia de cultivos de secano que se cultivan aledaños al área organopónica.

REFERENCIAS/REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.: *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, [en línea]*, ser. Estudio FAO Riego y Drenaje, no. ser. 56, Ed. FAO, Roma, Italy, 298 p., 2006, ISBN: 92-5-304219-2, Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>, [Consulta: 21 de octubre de 2015].
- AVILA-PRATS, D.; ALESANCO-GARCÍA, R.; GARCÍA-GARCÍA, F.: “Coste del kWh eólico generado en Cuba, a partir de datos de viento de una región de buenos potenciales eólicos”, *Ingeniería Mecánica*, 13(3): 38-45, 2010, ISSN: 1815-5944, Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59442010000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- BESNIER, F.: *La energía solar en agricultura*, ser. Publicaciones de extensión agraria, Hojas Divulgadoras, no. ser. 11–12, Ed. Ministerio de la Agricultura, España, 20 p., 1980, ISBN: 84-341-0226-9.
- CRUZ-BAUTISTA, F.; ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A.; ÁLVAREZ-REYNA, V.; CANO-RÍOS, P.; RIVERA-GONZÁLEZ, M.; SILLER-GONZÁLEZ, M.: “Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo”, *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4): 131-140, 2015, ISSN: 2007-2422, Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222015000400009&lng=es&nrm=iso&tlng=es, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- FERREYRA, R.; SELLÉS, G.; PIMSTEIN, A.: “Diseño, manejo y mantención de equipos de riego localizado de alta frecuencia”, *Boletín INIA*, (35): 55, 2000, ISSN: 0717-4829.
- FONTOVA, M.; GARCÍA, E.: *Ingeniería de Riego*, Ed. Félix Varela, La Habana, Cuba, 2001, ISBN: 959-258-160-6.
- IUSS WORKING GROUP WRB: *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*, Micheli, E. (ed.), ser. World Soil Resources Reports, no. ser. 103, Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2.ª ed., Rome, Italy, 128 p., Primera Actualización, 2007, ISBN: 978-92-5-105511-3.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D.: *Sprinkle and trickle irrigation*, no. solc. S619.S66 K45 1990, Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 652 p., 1990, ISBN: 978-0-442-24645-7.
- MONTESINOS, A.; MORENO, C.: “La energía eólica en las islas caribeñas”, *Revista Energía y Tú*, (62): 20-24, 2013, ISSN: 1028-9925.
- MORENO, C.: “Cuba en el escenario eólico mundial Reporte sobre la VII Conferencia Mundial de Energía Eólica”, *Revista Energía y Tú*, (43): 23-24, 2008, ISSN: 1028-9925.
- MORENO, C.: “¿Cuál molino de viento instalar? Una guía para seleccionar molinos de viento para el bombeo de agua”, *Revista Energía y Tú*, (59): 21-24, 2012, ISSN: 1028-9925.
- MUJICA, C.A.; CARMENATES, H.D.; PANEQUE, R.P.: “Determinación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo en el riego subsuperficial para el cultivo de la caña de azúcar”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(Suppl.): 59–62, 2012, ISSN: 1010-2760.
- PACHECO, J.; ALONSO, N.; PUJOL, P.; CAMEJO, E.: *Riego y Drenaje*, Ed. Pueblo y Educación, 2.ª ed., La Habana, Cuba, 2007, ISBN: 978-959-07-0621-9.
- REGUEIRO, F.R.M.; CHAVEZ, A.H.: “El desarrollo eólico en Brasil, Ecuador y España: Reflexiones a partir del marco normativo”, *Revista de estudios económicos y empresariales*, (26): 95-112, 2014, ISSN: 0212-7237, Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4875501>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- RODRÍGUEZ-GARCÍA, M.R.; MARTÍNEZ-VARONA, R.: “Indicadores agronómicos del riego por goteo sub superficial para el banano (musa sp.) en suelos ferralíticos rojos”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 7(1): 28-32, 2017, ISSN: 2227-8761, Disponible en: <http://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/510>, [Consulta: 30 de enero de 2017].
- ROGÉRIO, M.A.; BROWN, M.O.; MUJICA, C.A.; MATA, R.C.; OSORIO, L.I.: “Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2): 11-17, 2015, ISSN: 2071-0054, Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542015000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es, [Consulta: 30 de enero de 2017].

Received: 25/01/2017.

Approved: 22/12/2017.

Oscar Brown-Manrique, Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Departamento de Ingeniería Civil, Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: obrown@unica.cu

Nestor Méndez-Jurjo, e-mail: nestorm@unica.cu

Mabel Bernal Espinosa, e-mail: obrown@unica.cu

Note: The mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor.