



ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

New Criterion for Hydraulic Design of Central Pivot Irrigation System

Nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central

Dr.C. Maiquel López-Silva^I, Dr.C. Dayma Carmenates-Hernández^I, Dr.C. Albi Mujica-Cervantes^I,
y Dr.C. Pedro Paneque-Rondon^{II}

^I Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos,
Ciego de Ávila, Cuba.

^{II} Universidad Agraria de La Habana (UNAH), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

ABSTRACT. The hydraulic design of the central pivot irrigation system was carried out with groundwater extraction for maize cultivation. It was based on the integration of the characteristic curves of the aquifer, the well, the centrifugal pump and the pipes, considering hydrogeological, hydraulic, edaphic and agronomic variables, which generated a nonlinear equation, solved with the Newton Raphson's method to determine the design flow in the central pivot. The results obtained ratify the need to consider all factors to achieve an adequate hydraulic design, which contributes to save water and energy resources.

Keywords: design, central pivot, flow, characteristic curve

RESUMEN. Se realizó el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central con extracción de agua subterránea para el cultivo de maíz. Se fundamentó en la integración de las curvas características del acuífero, del pozo, de la bomba centrífuga y las tuberías, considerando las variables hidrogeológicas, hidráulicas, edáficas y agronómicas, que generaron una ecuación no lineal, solucionada con el método de Newton Raphson para determinar el caudal de diseño en el pivote central. Los resultados obtenidos ratifican la necesidad de considerar todos los factores para lograr un adecuado diseño hidráulico, que contribuye a un ahorro de los recursos hídricos y energéticos.

Palabras clave: diseño, pivote central, caudal, curva característica.

INTRODUCTION

The proper design of the central pivot irrigation systems supplied with groundwater contributes to the rational use of water, energy and increased crop productivity (López *et al.*, 2012) in order to guarantee its safety and to face uncertainties associated with climate change (Steduto *et al.*, 2012).

Seasonal variations in the water table and well depletions due to pumping have negative impact on the correct design and operation of the central pivot irrigation system (Izquier *et al.*, 2015). They induce alterations in the operation point of the centrifugal pump and stimulate interference phenomenon between wells (Tarjuelo *et al.*, 2015), which cause variations in operating pressure of the central pivot and discharge flow by side emitters. (Moreno *et al.*, 2012).

INTRODUCCIÓN

El diseño adecuado de los sistemas de riego de pivote central abastecido de agua subterránea contribuye al uso racional del agua, la energía y al aumento de la productividad del cultivo (López *et al.*, 2012) con el fin de garantizar su seguridad y enfrentar las incertidumbres asociadas al cambio climático (Steduto *et al.*, 2012).

Un aspecto que repercute negativamente en el correcto diseño y operación del sistema de riego del pivote central, son las variaciones estacionales en el nivel freático y el abatimientos del pozo producto al bombeo (Izquier *et al.*, 2015) que induce alteraciones en el punto de operación de la bomba centrífuga y estimula el fenómeno de interferencia entre pozos, lo que provoca variaciones en la presión de operación del pivote central y caudal descargado por los emisores en el lateral (Moreno *et al.*, 2012).

The design of the drive pipes and the irrigation side is important, because an oversizing in the pipe produces excess of speed and increase of energy loss, which implies an increase in the head of the system and the power absorbed by the pump to transpose the flow rate set at the pivot. In turn, it results in an over-dimensioning of the electric motor, which induces a reduction in the efficiency of the energy use, since loading below 75% of the nominal power requires more electric energy to produce the same mechanical energy (Kopp *et al.*, 2016).

In Cuba González and Navarro (1997), cited by Pérez (2003), made software called “PIVOT” for the design of central pivot irrigation systems, from the inflow and pressure required at the side end. It was directed at that time to systems of hydraulic and electric drive. Although that software considers the agronomic, edaphic and hydraulic aspects; it does not contemplate the hydrogeological parameter, and the hydraulic is not examined rigorously.

However, only a reference has been found by Moreno *et al.*, (2012) where he develops a methodology for the design of the central pivot taking into account the extraction of groundwater and its drive to the irrigation side, but it has as limitation that it does not consider well hydraulics in all its extension and it is restricted to periods tariffs of Spain.

In this sense, the objective of this work is to develop a new criterion for hydraulic design of the central pivot irrigation system, from the integration of the characteristic curves of the aquifer, the well, the centrifugal pump and the piping system to obtain the flow of design.

METHODS

To facilitate the calculation procedure, the flow diagram of the hydraulic design of the central pivot irrigation system is shown, based on the integration of the characteristic curves involved in the design. Figure 1 shows the diagram of the hydraulic design to facilitate the calculation procedure.

The starting point for the hydraulic design of the central pivot is to obtain the pivot intake flow for the crop in the period of maximum demand and it was determined by the following equation:

$$Q_{pivot} = 0,00277 \cdot \frac{N_n \cdot A}{Ea \cdot n_h} \quad (1)$$

Where:

Q_{pivot} is the pivot intake flow ($m^3 \cdot s^{-1}$);

N_n crop net requirements in the period of the highest demand ($mm \cdot d^{-1}$), 6.5 $mm \cdot d^{-1}$ was evaluated;

Ea irrigation application efficiency (decimal) was considered 82% for real field conditions according to López *et al.* (2012);

T the number of irrigation hours ($h \cdot d^{-1}$).

The point of operation of the centrifugal pump was determined, it was the intersection of the characteristic curve of the system (H_s) and the characteristic curve of the centrifugal pump (H_b) that conforms to a second degree polynomial as the following equations are shown:

El diseño de las tuberías de impulsión y el lateral de riego es importante, debido a que, un sobredimensionamiento en la tubería produce exceso de velocidad y aumento de pérdida de energía, que implica aumento de la altura manométrica del sistema y de la potencia absorbida por la bomba para transponer el caudal establecido en el pivote. A su vez, repercute en un sobredimensionamiento del motor eléctrico, que induce la reducción en la eficiencia del uso de la energía, pues carga abajo del 75% de la potencia nominal requiere mayor cantidad de energía eléctrica para producir la misma energía mecánica (Kopp *et al.*, 2016).

En Cuba González y Navarro (1997) citado por Pérez (2003), realizaron un software denominado “PIVOT” para el diseño de los sistemas de riego de pivote central, a partir del caudal de entrada y presión necesaria en el extremo del lateral. Fue dirigido en esa época a sistemas de accionamiento hidráulico y eléctrico. Aunque este considera los aspectos agronómicos, edáficos e hidráulicos, no contempla el parámetro hidrogeológico y el hidráulico no es examinado rigurosamente.

Sin embargo, solo se ha encontrado una referencia de Moreno *et al.* (2012) donde desarrollan una metodología para el diseño del pivote central teniendo en cuenta la extracción de agua subterránea y su impulsión al lateral de riego, pero tienen como limitante que no consideran la hidráulica de pozo en toda su extensión y se restringe a periodos tarifarios de España. El objetivo de este trabajo es desarrollar un nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central, a partir de la integración de las curvas características del acuífero, el pozo, la bomba centrífuga y el sistema de tuberías para la obtención del caudal de diseño.

MÉTODOS

El nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central para el cultivo de maíz, se fundamenta en la integración de las curvas características del acuífero, del pozo, de la bomba centrífuga y las tuberías, considerando las variables hidrogeológicas, hidráulicas, edáficas y agronómicas. En la Figura 1 se muestra el diagrama del diseño hidráulico para facilitar el procedimiento de cálculo.

El punto de partida para el diseño hidráulico del pivote central es obtener el caudal a la entrada del pivote para el cultivo en el período de máxima demanda y se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{pivot} = 0,00277 \cdot \frac{N_n \cdot A}{Ea \cdot n_h} \quad (1)$$

donde:

Q_{pivot} es el caudal a la entrada del pivote ($m^3 \cdot s^{-1}$);

N_n las necesidades netas del cultivo en período de mayor demanda ($mm \cdot d^{-1}$);

Ea la eficiencia de aplicación del riego (decimal), se consideró 82% para condiciones reales de campo según López *et al.* (2012);

n_h el número de horas de riego ($h \cdot d^{-1}$).

Se determinó el punto de operación de la bomba centrífuga, siendo este, la intersección de la curva característica del sistema (H_s) y la curva característica de la bomba centrífuga (H_b) que se ajusta a un polinomio de segundo grado según se muestran las siguientes ecuaciones:

$$H_s = H_b \tag{2}$$

$$H_s = h_g + S_T + P_p + hf_{sil} \tag{3}$$

$$H_b = D + EQ + FQ^2 \tag{4}$$

Where:

- H_b is manometric height of the pump (m);
- H_s manometric height to be overcome by the pump (m);
- Q flow rate of the centrifugal pump ($m^3 s^{-1}$);
- D, E, F , curve fitting coefficients; h_g suction height of the static water level in the well (m);
- S_T total water withdrawal at the well (m);
- P_p pressure at the pivot (m) and hf_{sil} friction load losses in the suction pipe, drive and accessories (m).

$$H_s = H_b \tag{2}$$

$$H_s = h_g + S_T + P_p + hf_{sil} \tag{3}$$

$$H_b = D + EQ + FQ^2 \tag{4}$$

donde:

- H_b es la altura manométrica de la bomba (m);
- H_s la altura manométrica que debe vencer la bomba (m);
- Q el caudal de la bomba centrífuga ($m^3 \cdot s^{-1}$);
- D, E, F , los coeficientes de ajuste de la curva;
- h_g la altura de succión del nivel estático del agua en el pozo (m);
- S_T el abatimiento total del agua en el pozo (m);
- P_p la presión en el pivote (m);
- hf_{sil} las pérdidas de carga por fricción en la tubería de succión, impulsión y accesorios (m).

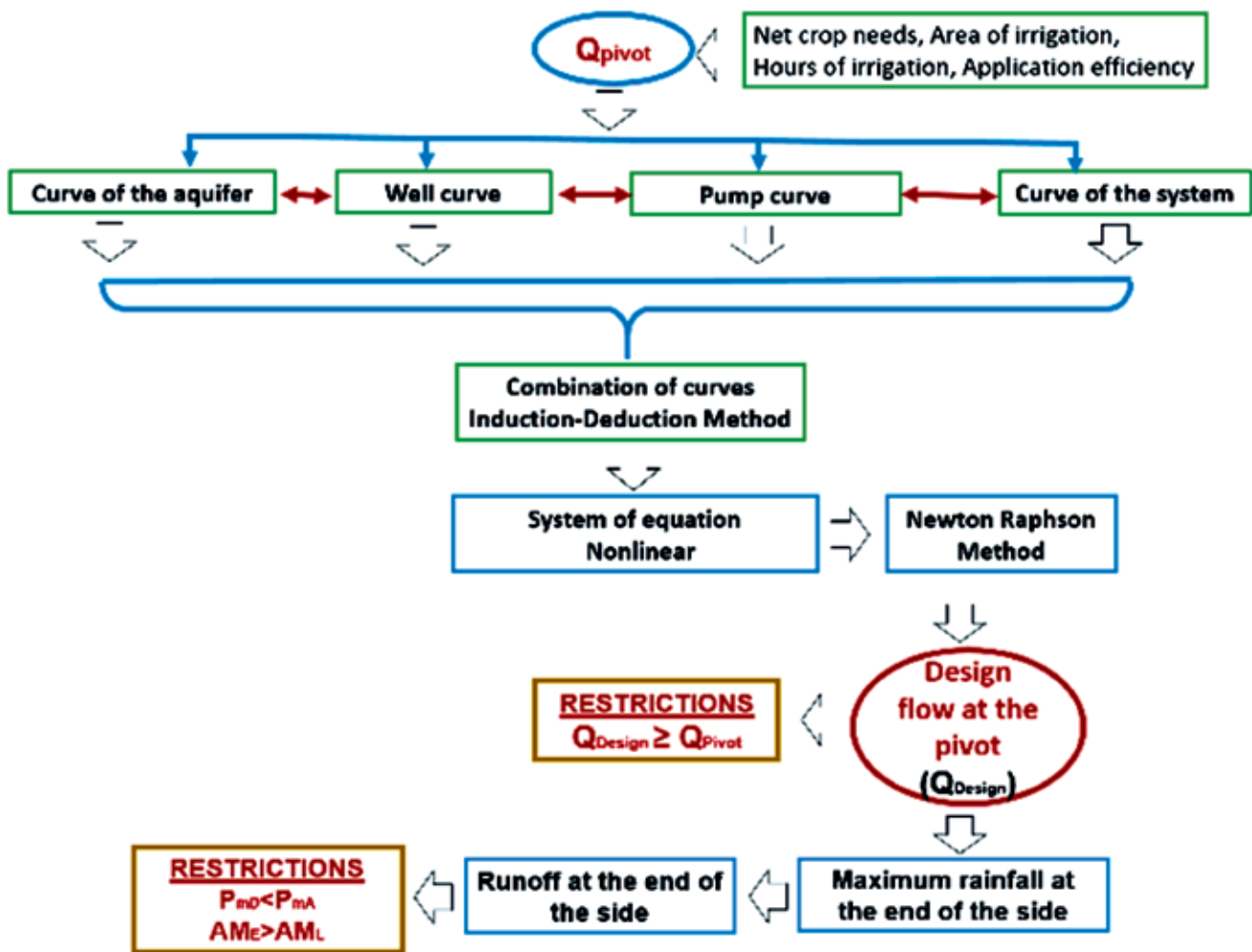


FIGURE 1. Diagram of the central pivot hydraulic design.
 FIGURA 1. Diagrama del diseño hidráulico del pivote central.

Curve fitting coefficients in equation (4) are obtained from the characteristic curve of the centrifugal pump provided by the manufacturer and a series of points (H_i vs Q_i) are selected, applying the method of least squares adjustment.

To obtain the total water withdrawal in the well in equation (3), it was assumed that the type of aquifer is free and there is

Los coeficientes de ajuste de la curva en la ecuación (4) se obtiene de la curva características de la bomba centrífuga que proporciona el fabricante y se seleccionan una serie de puntos (H_i vs Q_i), que se le aplica el método de los mínimos cuadrados con ajuste estadístico.

Para obtener el abatimiento total del agua en el pozo en la ecuación (3) fue mediante el supuesto que el tipo de acuífero es

a linear flow in steady state, using the equation proposed by Vatankhah (2014) that in a simplified way is proposed by the following equation:

$$S_T = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{2,246 \cdot T \cdot t_f}{r_p^2 \cdot E} + CQ^2 \quad (5)$$

Where:

S_T is total water withdrawal of the well (m);
 Q flow rate of the pump ($m^3 s^{-1}$);
 T transmissivity ($m^2 s^{-1}$); t_f operating time of the pump (s);
 r_p well radius (m);
 E coefficient of storage (dimensionless);
 CQ^2 water withdrawal in the well (m), C value was determined by the criterion of Walton (1960).

The pressure in the central pivot was determined in equation (4), taking into account the type of emitter on the side, the length and diameter of the side pipe; as well as the height of the pivot and the topographic difference (López, 2015), which is expressed by the following equation:

$$P_p = P_o + hf_T + h_p + \Delta Z \quad (6)$$

Where:

P_p is pressure at the pivot (m);
 P_o operating pressure of the last emitter on the side (m);
 hf_T total friction loss on the side;
 h_p pivot height (m) and ΔZ topographic difference between the pivot point and the side end (m), which was considered to be level relive.

The friction load losses in the suction and discharge piping were calculated by Darcy-Weisbach's method and the friction factor by Swamer and Jain's equation considering the same suction and discharge diameters (Mantovani *et al.*, 2012). While total friction load losses on the central pivot side, were calculated from Hazen William's equation with the formulated correction factor (Alazba *et al.*, 2012).

The central pivot design flow rate for the specific operating conditions is obtained from the combinations of the characteristic curves by the induction-deduction method of formulas (5) and (6), substituted in equations (3) and (4), and later in (2) form a non-linear equation, whose solution is by Newton Raphson's method. This design flow obtained must be equal to or greater than 10% of the pivot intake flow obtained by equation (1) to satisfy net requirements of the crop in the period of greatest demand.

The maximum rainfall in the central pivot from the design flow rate was determined by the theory of Dillon *et al.*, (1972), assuming that the water distribution model is elliptical, is expressed by the following equation:

$$P_{mD} = \frac{28800 \cdot Q \cdot Pe}{\pi \cdot R_r \cdot AM_E} \quad (7)$$

Where:

P_{mD} is the maximum rainfall at the side end ($mm h^{-1}$);
 Q flow rate of the pump ($L s^{-1}$); R_r irrigated radius of the central pivot (m);

libre y existe un flujo lineal en régimen permanente, mediante la fórmula propuesta por Vatankhah (2014) que de forma simplificada se plantea mediante la siguiente ecuación:

$$S_T = \frac{Q}{2\pi \cdot T} \ln \frac{2,246 \cdot T \cdot t_f}{r_p^2 \cdot E} + CQ^2 \quad (5)$$

donde:

S_T es el abatimiento total del pozo (m);
 T la transmisividad ($m^2 \cdot s^{-1}$);
 t_f el tiempo de funcionamiento de la bomba (s);
 r_p el radio del pozo (m);
 E el coeficiente de almacenamiento (adimensional);
 CQ^2 el abatimiento en el pozo (m), el valor de C se determinó por el criterio de Walton (1991).

Se obtuvo la presión en el pivote central en la ecuación (3), teniendo en cuenta el tipo emisor en el lateral, la longitud y diámetro de la tubería del lateral; así como la altura del pivote y el desnivel topográfico, que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_p = P_o + hf_T + h_p + \Delta Z \quad (6)$$

donde:

P_o la presión de funcionamiento del último emisor en el lateral (m);
 hf_T la pérdida de carga total por fricción en el lateral;
 h_p la altura del pivote (m) y ΔZ el desnivel topográfico entre el punto del pivote y la extremidad del lateral (m), siendo este relativamente llano.

Las pérdidas de carga por fricción en la tubería de succión e impulsión, se calculó por el procedimiento de Darcy-Weisbach y el factor de fricción por la ecuación de Swamer y Jain, considerando los diámetros de succión e impulsión iguales (Mantovani *et al.*, 2012). Mientras que, las pérdidas de carga total por fricción en el lateral del pivote central, se calculó a partir de la ecuación de Hazen William con el factor de corrección formulado (Alazba *et al.*, 2012).

El caudal de diseño del pivote central para las condiciones específicas de explotación, es obtenido a partir de las combinaciones de las curvas características por el método inducción-deducción de las ecuaciones (5) y (6) sustituidas en las ecuaciones (3) y (4) y posteriormente en la (2) forman una ecuación no lineal, cuya solución es mediante el método de Newton Raphson. Este caudal de diseño obtenido debe ser igual o superior hasta un 10% del caudal a la entrada del pivote obtenido mediante la ecuación (1) para satisfacer las necesidades netas del cultivo en el periodo de mayor demanda.

La pluviosidad máxima en el pivote central a partir del caudal de diseño se determinó por la teoría de Dillon *et al.* (1972), suponiendo que el modelo de reparto de agua es elíptico, pudiéndose representar mediante la siguiente ecuación:

$$P_{mD} = \frac{28800 \cdot Q \cdot Pe}{\pi \cdot R_r \cdot AM_E} \quad (7)$$

donde:

P_{mD} es la pluviosidad máxima en el extremo del lateral ($mm h^{-1}$);
 Q el caudal de la bomba centrífuga ($L s^{-1}$);
 R_r el radio regado del pivote central (m);

AM_E width wetted by the last emitters (m), it was selected by the type of emitter and Pe proportion of water reaching the ground surface (decimal), defined as 0,95 for the case study.

The maximum rainfall that the central pivot can provide was determined by the algorithm simplified by Pérez and Martínez (2004), which is expressed by the following equations:

$$i = K \cdot t^n \quad (8)$$

AM_E la anchura humedecida por los últimos emisores (m), esta fue seleccionada por el tipo de emisor y Pe la proporción del agua que llega a la superficie del suelo (decimal), definido como 0,95 para el caso de estudio.

Se determinó la máxima pluviosidad que puede proporcionar el pivote central mediante el algoritmo simplificado por Pérez y Martínez (2004) que se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$i = K \cdot t^n \quad (8)$$

$$P_{mA} = \frac{1}{\left\{ \frac{\frac{SR}{K} + \left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D_A}{Dba} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2}}{(D_A - AS)^{n/(n+1)} \cdot (n+1)^{n/(n+1)} \cdot K^{n/(n+1)}} \right\}} \quad (9)$$

$$D_A = Dba \cdot \frac{1}{2} \left\{ (n+1) \left(\frac{AS}{Dba} + 0.5 \right) - n + \sqrt{\left[n - (n+1) \left(\frac{AS}{Dba} + 0.5 \right) \right]^2 - 4 \left[0.25 \left(2(n+1) \left(\frac{AS}{Dba} \right) - n \right) + 0.656 \cdot n \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \right]} \right\} \quad (10)$$

Where:

i is speed of infiltration (mm min^{-1});
 K and n experimental coefficients of Kostiakov's equation fitting,
 t time elapsed since the beginning of water application at a point (min);
 P_{mA} maximum rainfall the central pivot can provide (mm min^{-1});
 SR sealing factor, considered 0,16 for alfalfa stubble according to Tarjuelo (2005);
 AS surface storage capacity of the soil;
 D_A sheet of water applied to the ground in a time (mm) and
 Dba applied gross sheet (mm), considered 10 mm according to Tarjuelo (2005).

The minimum time of irrigation and the minimum speed of advance of the last tower on a point of the terrain were calculated so that the runoff does not occur in the elliptical model, from the following expressions:

$$t_p = \frac{4Dba}{\pi P_{mA}} \quad (11)$$

$$V = \frac{2\pi \cdot L_t \cdot N_n}{60 \cdot EDa \cdot Dba \cdot T_d} \quad (12)$$

$$T_d = \frac{2,784 \cdot N_n \cdot A}{Ea \cdot Q} \quad (13)$$

$$AM_L = t_p \cdot V \quad (14)$$

donde:

i es la velocidad de infiltración ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$);
 K y n los coeficientes experimentales de ajuste de la ecuación de Kostiakov;
 t el tiempo transcurrido desde que comienza la aplicación de agua en un punto (min);
 P_{mA} la máxima pluviosidad que puede proporcionar el pivote central ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$);
 SR el factor de sellado, considerado 0,16 para restrojo de alfalfa según Tarjuelo (2005);
 AS capacidad de almacenamiento superficial del suelo;
 D_A la lámina de agua aplicada al terreno en un tiempo (mm);
 Dba la lámina bruta aplicada (mm), considerada 10 mm según Tarjuelo (2005).

Se calculó el tiempo mínimo de riego y la velocidad mínima de avance de la última torre sobre un punto del terreno para que no se produzca la escorrentía en el modelo elíptico, a partir de las siguientes expresiones:

$$t_p = \frac{4Dba}{\pi P_{mA}} \quad (11)$$

$$V = \frac{2\pi \cdot L_t \cdot N_n}{60 \cdot EDa \cdot Dba \cdot T_d} \quad (12)$$

$$T_d = \frac{2,784 \cdot N_n \cdot A}{Ea \cdot Q} \quad (13)$$

$$AM_L = t_p \cdot V \quad (14)$$

where:

t_p is the time of water distribution in passing the side end over a point (min);
 V minimum speed of the last tower (m.min⁻¹);
 T_d time the side emitter takes to apply an irrigation per day (h.d⁻¹);
 AM_L minimum wetted strip at the side end (m);
 L_t distance from central pivot to the last tower (m);
 EDa water distribution efficiency (decimal).

It is shown an example of the hydraulic design of the central pivot irrigation system with extraction of groundwater, from a free aquifer, with a well with a radius of 0,2 m, storage coefficient of 0,09599, hydraulic conductivity of 76,03 m d⁻¹ and transmissivity of 1,36×10⁻² m² s⁻¹; as well as several scenarios of water table levels from 17 m, which could grow or decrease by 10, 30, 60 and 75%.

The lateral of the pivot with a length of 451 m, which represents an area under economic irrigation of 63,87 ha according to Montero *et al.*, (2012) and commercial diameters of 101,6 mm; 127,0 mm; 168,30 mm; 219,10 mm; 254,0 mm; as well as the most used emitters in the national and international market Cuban diffuser nozzle, Spray, Rotator and Wobbler. The characteristic curves of the deep well vertical pumps used were the IDEAL series VG 250 / 3F to 6F at 60 Hz.

RESULTS AND DISCUSSION

Centrifugal pump and central pivot

It was determined that the minimum flow that must circulate through the central pivot to meet the water requirements of corn crop was 70,10 L s⁻¹. An amount of 345 possible combinations were made between pump characteristic curves, water table in the well, commercial pipe diameters and lengths of the pivot side and their respective types of emitters, which compensates for the minimum flow that must flow through the central pivot and meet the crop water needs.

The most suitable pump was of type VG 125 / 4F with drive pipe nominal diameter of 200 mm and 8 m of length. The side of the central pivot was the one of 8 towers of 55 m, with an 11 m eave and diameter of 168,30 mm (65/8") and 101,60 mm (4") respectively. This result agrees with the study by Montero *et al.*, (2012), in which the lateral diameters of 168,3 mm were the most economical for the areas between 40 and 75 ha.

The central pivot irrigation system presented a hydro module of 1,20 L s⁻¹ ha⁻¹ for an operating time of 20 h d⁻¹, however, it differs from the values obtained by Moreno *et al.*, (2012) with hydro module of 1,50 L s⁻¹ ha⁻¹ and 18 h d⁻¹. That demonstrates the need to consider in the designs of the central pivot, all the elements involved in the specific conditions of exploitation.

Centrifugal pump operating point and groundwater

Table 1 shows the operating points of the irrigation system according to the emitter used in the central pivot. It is observed that the central pivot equipped with the Rotator emitter obtains the lowest flow rate at the pivot of 77,05 L s⁻¹, it is closer to the minimum flow rate to meet the corn crop net requirements in the highest demand period of 70,10 L s⁻¹. However, it requires the highest manometric height of

donde:

t_p es el tiempo de reparto de agua en pasar el extremo del lateral sobre un punto (min);
 V es la velocidad mínima de la última torre (m.min⁻¹);
 T_d el tiempo que demora el lateral en aplicar un riego al día (h.d⁻¹);
 AM_L es la franja mínima humedecida en el extremo del lateral (m);
 L_t distancia del centro pivote hasta la última torre (m);
 EDa la eficiencia de distribución del agua (decimal).

El criterio del diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central con extracción de agua subterránea, se aplicó a un acuífero libre, con un pozo de radio de 0,2 m, el coeficiente de almacenamiento de 0,09599, la conductividad hidráulica de 76,03 m.d⁻¹ y la transmisividad de 1,36×10⁻² m².s⁻¹; así como 10 escenarios de los niveles freáticos del pozo a partir de los 17 m, que podrían crecer o decrecer en un 10, 30, 60 y 75%. Mientras que el área de riego fue de 64 ha para el cultivo de maíz con una evapotranspiración de 6,5 mm.d⁻¹ en un suelo Ferralítico Rojo Típico con coeficientes experimentales de ajuste de la ecuación de Kostiakov de K y n de 24,80 mm.min⁻¹ y 0,3236 respectivamente según Pérez y Martínez (2004).

Se analizaron los diámetros comerciales más utilizados para los laterales del pivote central de 101,6 mm; 127,0 mm; 168,30 mm; 219,10 mm; 254,0 mm; así como los emisores más empleados como la boquilla difusora cubana, el Spray, el Rotator y el Wobbler. La curvas características de las bombas verticales de pozo profundo empleadas fueron del tipo IDEAL serie VG 250/3F a 6F a 60 Hz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bomba centrífuga y pivote central

A partir de los niveles freáticos en el pozo, los diámetros y longitudes comerciales de las tuberías del lateral del pivote y sus respectivos tipos de emisores, para que compense el caudal mínimo que debe circular por el pivote central y satisfacer las necesidades hídricas del cultivo se realizaron 345 combinaciones. Los resultados proporcionaron que el caudal mínimo que debe circular por el pivote central fuese de 70,10 L.s⁻¹. Siendo seleccionada la bomba del tipo VG 125/4F con diámetro nominal de la tubería de impulsión de 200 mm y 8 m de longitud. El lateral del pivote central fue el de 8 torres de 55 m, con un alero de 11 m y diámetro de 168,30 mm (65/8") y 101,60 mm (4") respectivamente. Este resultado concuerda con el estudio realizado por Montero *et al.* (2012) en el que demostraron que los diámetros del lateral de 168,3 mm es el más adecuado y económico para las áreas entre 40 a 75 ha.

El sistema de riego de pivote central presentó un hidromódulo de 1,20 L s⁻¹ ha⁻¹ para un tiempo de funcionamiento de 20 h.d⁻¹; sin embargo, difiere de los valores obtenidos por Moreno *et al.* (2012) con hidromódulo de 1,50 L.s⁻¹.ha⁻¹ y 18 h.d⁻¹. Esto demuestra, la necesidad de considerar en los diseños del pivote central todos los elementos involucrados en las condiciones específicas de explotación.

Punto de operación de la bomba centrífuga y niveles freáticos

En la Tabla 1 se muestran los puntos de operación del sistema de riego según el emisor empleado en el pivote central. Se

the pump, which allows the lowest pump power to be used with the highest efficiency for specific operating conditions.

observa que el pivote central dotado del emisor Rotator obtiene el menor caudal en el pivote de 77,05 L·s⁻¹, éste se aproxima más al caudal mínimo para satisfacer las necesidades netas del cultivo de maíz en período de mayor demanda de 70,10 L·s⁻¹. Sin embargo, necesita la mayor altura manométrica de la bomba, que permite emplear la menor potencia de la bomba con la mayor eficiencia para las condiciones específicas de explotación.

TABLE 1. Operating point of the irrigation system according to the type of emitter
TABLA 1. Punto de operación del sistema de riego según el tipo de emisor

Parameter	Type of emitter			
	Cuban diffuser nozzle	Spray	Rotator	Wobbler
Q (L/s)	78,74	81	77,05	79,27
H _b (m)	80,67	78,7	82,1	80,21
η _b (%)	81,9	81,17	82,34	81,75
P (kW)	76,08	77,04	75,37	76,3

Figures 2 and 3 show the operating points of the characteristic curves of the pump and the water tables according to the types of emitters. It is observed how the points of operation move as they rise and fall in the phreatic levels, but they are more significant when they are ascendant from 10%. This factor has an effect on an increase of the flow rate and decrease of the manometric height and efficiency of the pump, which adversely influences the irrigation efficiency; however decreases the power exerted by the centrifugal pump and consequently the energy consumption.

En las Figuras 2 y 3 se muestran los punto de operación de las curvas características de la bomba y los niveles freáticos según tipos de emisores. Se observan como los puntos de operación se desplazan según se alteran los niveles freáticos, pero son más significativos cuando estos son ascendentes a partir de un 10%. Este factor repercute en un aumento del caudal y disminución de la altura manométrica y eficiencia de la bomba, que influye desfavorablemente en la eficiencia del riego; sin embargo disminuye la potencia que ejerce la bomba centrífuga y consecuentemente el consumo de energía.

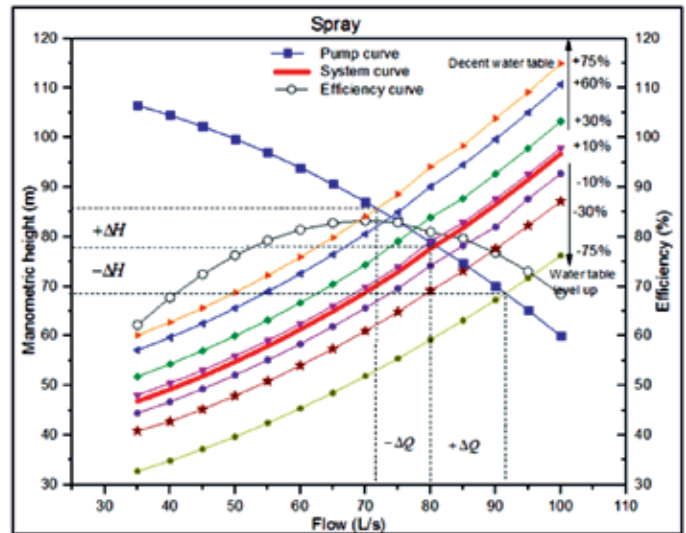
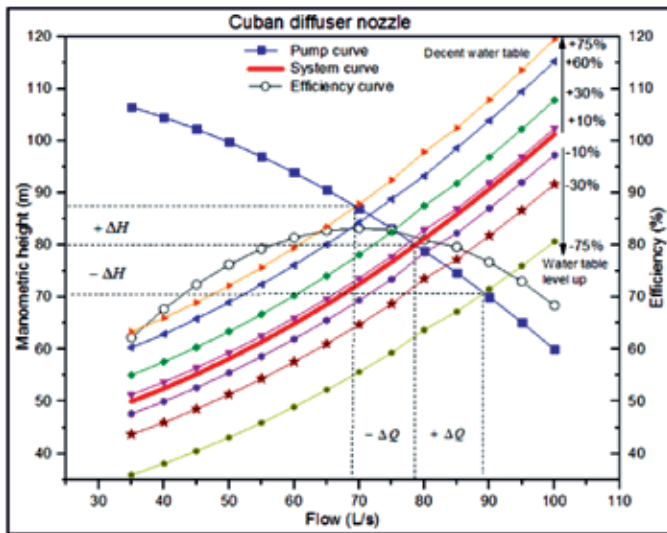


FIGURE 2. Operation point on the pump characteristic curve with the emitter Cuban diffusing nozzle and Spray.
 FIGURA 2. Punto de operación en la curva característica de la bomba con el emisor boquilla difusora cubana y el Spray.

In this specific case it is observed in Figures 2 and 3 that the advantage of the water table is decreasing, is that according to the efficiency curve of the centrifugal pump it improves as the percentage decreases from the level of the well.

It is observed in Figure 2 that the operating point of the irrigation system coupled with the Spray emitter is more easily displaced from 10% of the water table level than with the diffusion nozzle. The flow rate used by the pivot with

Se observa en la Figura 2 que el punto de operación del sistema de riego acoplado con el emisor Spray se desplaza con más facilidad a partir del 10% del nivel freático ascendente, que respecto al de la boquilla difusora cubana. El caudal empleado por el pivote con emisor Spray supera el caudal de la boquilla difusora cubana en 4,34%; sin embargo, disminuye su altura manométrica en 3,23%.

Se observa en la Figura 3 que el punto de operación del sistema de riego acoplado con el emisor Wobbler se desplaza con más facilidad a partir del 10% del nivel freático ascendente, que respecto al

Spray emitter exceeds the flow rate of the Cuban diffusing nozzle at 4,34%; however, it decreases its manometric height by 3,23%.

Rotator. El caudal empleado por el pivote con emisor Wobbler supera el caudal del Rotator en 3,45%; sin embargo, en ambos emisores la altura manométrica es prácticamente estable en solo 0,5%.

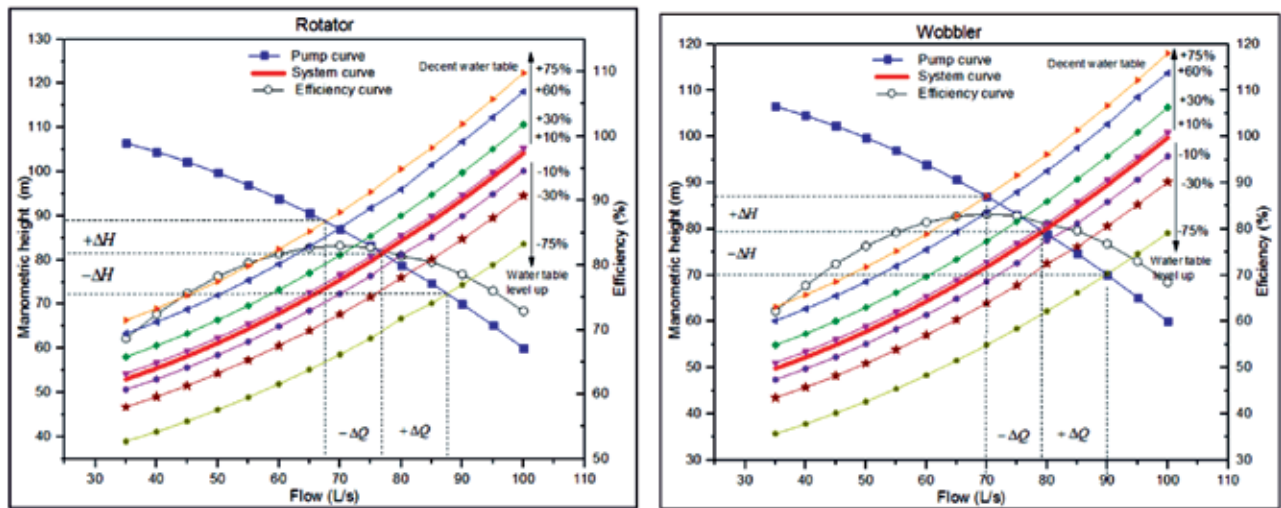


FIGURE 3. Operating point in the characteristic curve of the pump with the Rotator and Wobbler emitter.
 FIGURA 3. Punto de operación en la curva característica de la bomba con el emisor Rotator y Wobbler.

It can be observed in Figure 3 that the operating point of the irrigation system coupled with the Wobbler emitter moves more easily from 10% of the water table level than with respect to the Rotator. The flow used by the pivot with Wobbler emitter exceeds the flow of the Rotator in 3,45%; however, in both emitters the manometric height is practically stable in only 0,5%.

El análisis del punto de operación del sistema permite conocer el caudal real que está siendo bombeado, la altura manométrica y la energía consumida para cualquier nivel freático, lo que posibilita ajustar el caudal para el punto de operación deseado, mejorando la eficiencia del sistema.

The analysis of the operating point of the system allows knowing the actual flow being pumped, the manometric height and the energy consumed for any water table, from there; it is possible to adjust the flow rate for the desired operating point, which improves the efficiency of the system.

Se muestra en la Figura 4 la potencia y eficiencia de la bomba centrífuga en función del nivel freático del pozo. Se observa como repercute las fluctuaciones de los niveles freáticos del pozo en el consumo de potencia y eficiencia de la bomba centrífuga.

The power and efficiency of the centrifugal pump in function of the well water table are shown in Figure 4. It is observed how the fluctuations of the water table of the well affect the consumption of power and efficiency of the centrifugal pump.

Se observa en la Figura 4 que cuando el nivel freático asciende a más del 10% del nivel estático, aumenta la potencia de la bomba a 0,5 kW por cada 10% que asciende el nivel freático en el pozo, no siendo significativo el aumento de la eficiencia de la bomba. Es este aspecto, si el motor eléctrico no fue calculado para transmitir mayor potencia a la bomba centrífuga, trabajará en sobre carga y podrá averiarse, además de consumir más energía eléctrica de acuerdo con Tarjuelo (2005).

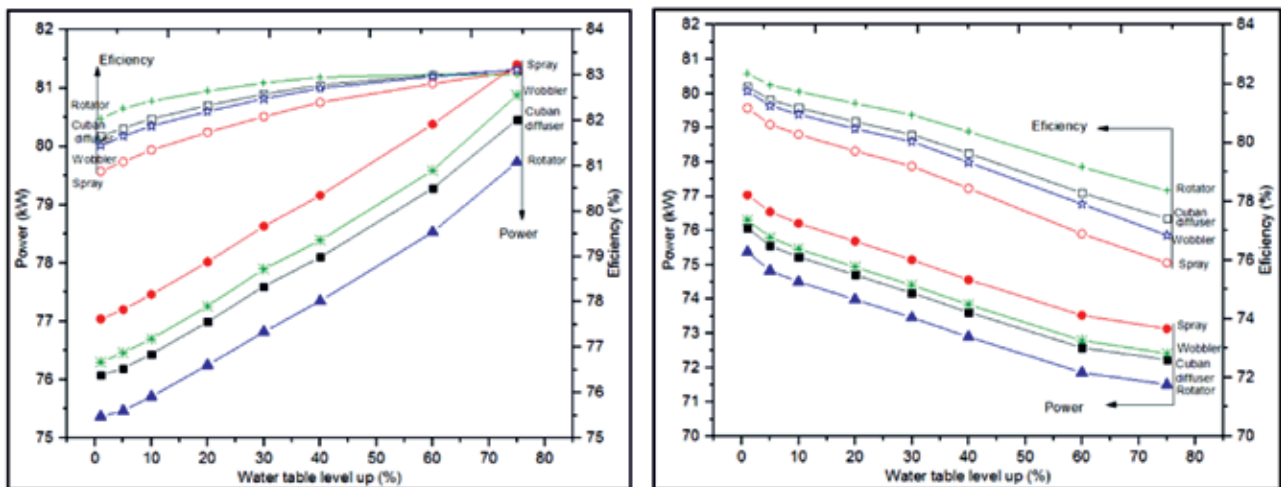


FIGURE 4. The power and efficiency of the centrifugal pump as a function of the water table of the well.
 FIGURA 4. La potencia y eficiencia de la bomba centrífuga en función del nivel freático del pozo.

It is observed in Figure 4 that when the water table reaches more than 10% of the static level, the power of the pump increases to 0,5 kW per 10% that increases the water table in the well, not being significant increase of the efficiency of the pump. It is this aspect, if the electric motor was not calculated to transmit more power to the centrifugal pump; it will work in overload and can be damaged, in addition to consuming more electric energy according to Tarjuelo (2005). Otherwise it happens when the water tables are deciduous. It can be concluded that by integrating the characteristic curves involved in the hydraulic design of the central pivot irrigation system under the specific operating conditions, it facilitates decision making and operation of the emitters, pipes, and the motor pump assembly, which in turn allows a saving of water and electricity.

Rainfall at the side end

Table 2 shows the results of the runoff analysis at the side end. It was demonstrated that it is possible to use the central pivot equipped with the emitters analyzed for the typical Ferrallitic Red soil. The maximum rainfall the soil can absorb (PmA) is of 8,04 mm min⁻¹, superior with the one emitted by the maximum rainfall in the side end (PmD) for each type of emitter.

Se puede concluir que mediante la integración de las curvas características que intervienen en el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central en las condiciones específicas de explotación, facilita la toma de decisión y operación de los emisores, las tuberías, y el conjunto bomba motor, que a su vez permite un ahorro de agua y energía eléctrica.

Pluviosidad en el extremo del lateral

En la Tabla 2 se exponen los resultados del análisis de la escorrentía en el extremo del lateral. Se demostró que es posible la utilización del pivote central dotado de los emisores analizados para el suelo Ferralítico Rojo típico. La máxima pluviosidad que puede absorber el suelo (P_{mA}) es de 8,04 mm min⁻¹, superior con la emitida por la pluviosidad máxima en el extremo del lateral (P_{mD}) para cada tipo de emisor.

Se confirma mediante los resultados en la tabla 1, la no existencia de la escorrentía en el extremo del lateral, producto que la franja mínima humedecida en el extremo del lateral (AM_L) de 3,28 m es inferior a la franja de los emisores (AM_E) desde 8 hasta 16 m. La velocidad mínima en la última torre debe ser de 2,07 para que el lateral demore en aplicar un riego como máximo de 18,89 h·d⁻¹.

TABLE 2 Analysis of the runoff at the side end
TABLA 2. Análisis de la escorrentía en el extremo del lateral

No.	P _{mD} (mm min ⁻¹)	P _{mA} (mm min ⁻¹)	AM _E (m)	T _d (h d ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	AM _L (m)
Cuban diffuser nozzle	3,54	8,04	8	17,80	2,07	3,28
Spray	2,89	8,04	12	17,40	2,07	3,28
Rotator	1,63	8,04	16	18,89	2,07	3,28
Wobbler	1,68	8,04	16	17,78	2,07	3,28

The absence of runoff at the end of the side is confirmed by the results in Table 2, due to the minimal strip wetted at the end of the side (AM_L) of 3,28 m is smaller than the range of the emitters (AM_E) from 8 to 16 m. The minimum speed in the last tower should be 2,07 for the lateral delays in applying an irrigation of 18,89 h d⁻¹ as maximum.

CONCLUSIONS

- A methodology was developed for the hydraulic design of central pivot irrigation systems with extraction of groundwater, for the specific exploitation conditions that allow obtaining the design flow of the central pivot.
- The importance of considering the hydrogeological, hydraulic, edaphic and agronomic variables in the design of the central pivot irrigation system for a rational use of water and energy resources was demonstrated.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un nuevo criterio para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivotes centrales con extracción de aguas subterráneas, para las condiciones específicas de explotación, que permiten la obtención del caudal de diseño del pivote central.
- El pivote central más adecuado para el riego del maíz fue el dotado por emisor Rotator de 8 torres de 55 m con diámetros de 168,30 mm y hidromódulo de 1,20 L·s⁻¹·ha⁻¹ para admitir perturbaciones del nivel freático en el pozo de 10%.
- Se demostró la importancia en considerar la variable hidrogeológica, hidráulica, edáfica y agronómica en el diseño del sistema de riego de pivote central para un uso racional de los recursos hídricos y energéticos.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAZBA, A.A.; MATTAR, M.A.; ELNESR, M.N.; AMIN, M.T.: "Field Assessment of Friction Head Loss and Friction Correction Factor Equations", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(2): 166-176, 2012, DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000387.

- DILLON, R.C.; HILER, E.A.; VITTETO, G.: "Center-Pivot Sprinkler Design Based on Intake Characteristics", *Transactions of the ASAE*, 15(5): 0996-1001, 1972, ISSN: 2151-0059, DOI: 10.13031/2013.38057.
- IZQUIEL, A.; CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.M.; MORENO, M.A.: "Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain", *Biosystems Engineering*, 135: 61-72, 2015, ISSN: 1537-5110, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.04.015.
- KÖPP, L.M.; PEITER, M.X.; ROBAINA, A.D.; TOESCHER, C.F.: "Caracterização de estações de bombeamento em lavouras de arroz do rio grande do sul", *Engenharia Agrícola*, 36(2): 342-351, 2016, ISSN: 0100-6916, DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p342-351/2016.
- LÓPEZ, M.; MUJICA, A.; BROWN, O.; CASTELLANO, L.: "Evaluación del consumo energético de las máquinas de pivotes centrales eléctricas en la empresa cultivos varios la Cuba provincia Ciego de Ávila", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(Suppl.): 30-34, 2012, ISSN: 1010-2760.
- LOUREIRO, G.F.; CARVALHO, J. de A.: "GRAFICBOMB: Software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento", *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, 20(4): 694-704, 2015, ISSN: 1808-8546, DOI: 10.15809/irriga.2015v20n4p694.
- MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F.: *Irrigação. Princípios e métodos*, Ed. UFV, 3.ª ed., Viçosa, Brasil, 2012, ISBN: 978-85-7269-373-8.
- MONTERO, J.; MARTÍNEZ, A.; VALIENTE, M.; MORENO, M.A.; TARJUELO, J.M.: "Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain", *Irrigation Science*, 31(3): 507-521, 2013, ISSN: 0342-7188, 1432-1319, DOI: 10.1007/s00271-012-0326-4.
- MORENO, M.A.; MEDINA, D.; ORTEGA, J.F.; TARJUELO, J.M.: "Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells", *Agricultural Water Management*, 107: 112-121, 2012, ISSN: 0378-3774, DOI: 10.1016/j.agwat.2012.01.016.
- PÉREZ, L.R.: *Nuevos criterios metodológicos y tecnológicos para el diseño hidráulico y la operación de máquinas de riego de pivote Central*, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba, 2003.
- PÉREZ, L.R.; MARTÍNEZ, G.Y.: "Simplificación y Adecuación del Método de Allen para determinar el caudal de diseño de los pivotes para el riego del cultivo de la papa", *Ingeniería Hidráulica en México*, 19(2): 89-100, 2004, ISSN: 0186-4076.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D.: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, [en línea]*, ser. Estudio FAO: Riego y Drenaje, no. ser. 66, Ed. FAO, Rome, Italy, 510 p., 2012, ISBN: 978-92-5-308564-4, Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015001461>, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- TARJUELO, J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Mundi-Prensa, 3.ª ed., Madrid, España, 581 p., 2005, ISBN: 84-8476-225-4.
- VATANKHAH, A.R.: "Full-Range Solution for the Theis Well Function", *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3): 649-653, 2014, ISSN: 1943-5584, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000833.
- WALTON, W.C.: *Principles of groundwater engineering*, Ed. Lewis Publishers, Chelsea, Mich., 546 p., 1991, ISBN: 978-0-87371-283-5.

Received: 25/10/2016.

Approved: 15/06/2017.

Maiquel López-Silva, Profesor e investigador, Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba, E-mail: maiquel@unica.cu

Dayma Carmenates-Hernández, E-mail: daymas@unica.cu

Albi Mujica-Cervantes, E-mail: albis@unica.cu

Pedro Paneque-Rondon, E-mail: paneque@unah.edu.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.