



**IV CONGRESO NACIONAL  
DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018**  
Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

**MODELO MATEMÁTICO PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS  
SISTEMAS DE RIEGO DE PIVOTES CENTRALES A PARTIR DE  
CRITERIOS HIDROGEOLÓGICOS, EDÁFICOS, AGRONÓMICOS,  
ECONÓMICOS Y OPERACIONALES**

**Maiquel López Silva<sup>1\*</sup>; Dayma Carmenates Hernández<sup>1</sup>; Albi Mujica Cervantes<sup>1</sup>;  
Oscar Brown Manrique<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Estudios Hidrotécnicos, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila  
"Máximo Gómez Báez" - Carretera a Morón km 9 ½ Ciego de Ávila Cuba.

[maiquelcuba@yahoo.com](mailto:maiquelcuba@yahoo.com) - (053) 58717520 (\*Autor de correspondencia)

**Resumen**

El presente trabajo ofrece modelo matemático para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivotes centrales a partir de criterios hidrogeológicos, edáficos, agronómicos, económicos y operacionales para el cultivo de maíz. Fue fundamentado 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 claves:** curvas, acuífero, pozo, bomba, tubería



## 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.*, 2011) 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).

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 períodos 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.

## Materiales y Métodos

El modelo matemático 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.

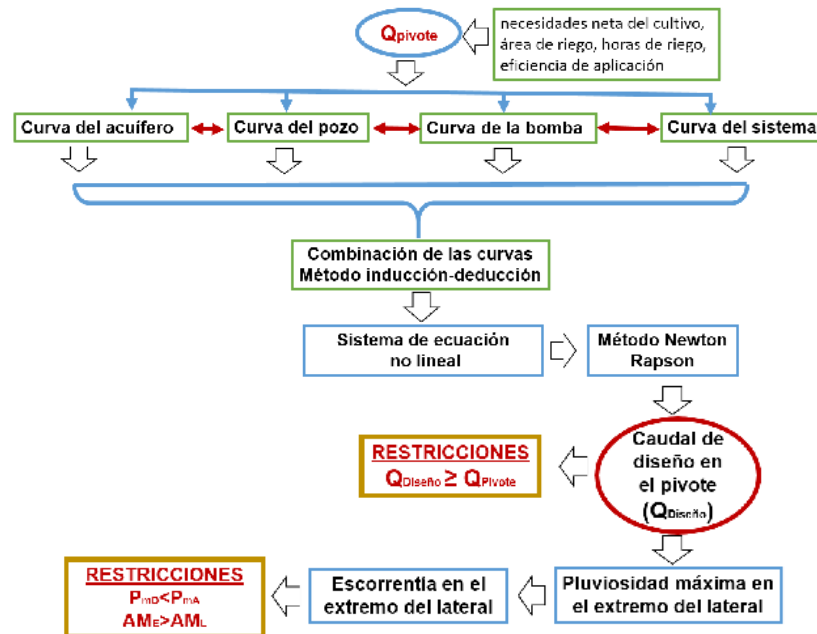


Figura 1. Diagrama del diseño hidráulico del pivote central.

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:

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

Donde  $Q_{pivote}$  es el caudal a la entrada del pivote ( $m^3 s^{-1}$ );  $N_n$  las necesidades netas del cultivo en período de mayor demanda ( $mm d^{-1}$ );  $Ea$  la eficiencia de aplicación del riego (decimal), se consideró 82% para condiciones reales de campo según (López *et al.*, 2011);  $n_h$  el número de horas de riego ( $h d^{-1}$ ).

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 (Ferreira *et al.*, 2015) según se muestran las siguientes ecuaciones:

$$H_s = H_b \quad (2)$$

$$H_s = h_g + S_T + P_p + hf_{sil} \quad (3)$$

$$H_b = D + EQ + FQ^2 \quad (4)$$

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 ( $m^3 s^{-1}$ );  $D$ ,  $E$ ,  $F$ , 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) y  $hf_{sil}$  las pérdidas de carga por fricción en la tubería de succión, impulsión y accesorios (m).



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 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 ( $m^2 s^{-1}$ );  $t_f$  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  $\Delta Z$  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 fórmulas (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 período 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 ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $Q$  el caudal de la bomba centrífuga ( $\text{L s}^{-1}$ );  $R_r$  el radio regado del pivote central (m);  $AM_E$  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:

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

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

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

Donde  $i$  es la velocidad de infiltración ( $\text{mm min}^{-1}$ );  $K$  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 ( $\text{mm min}^{-1}$ );  $SR$  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) y  $Dba$  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:

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



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

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

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

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 ( $\text{m min}^{-1}$ );  $T_d$  el tiempo que demora el lateral en aplicar un riego al día ( $\text{h d}^{-1}$ );  $AM_L$  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 modelo matemático para el 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  $\text{m d}^{-1}$  y la transmisividad de  $1,36 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; 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  $\text{mm d}^{-1}$  en un suelo Ferralítico Rojo Típico con coeficientes experimentales de ajuste de la ecuación de Kostiakov de  $K$  y  $n$  de 24,80  $\text{mm min}^{-1}$  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. Las 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  $\text{L s}^{-1}$ . 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 ( $6\frac{5}{8}$ " ) 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  $1,20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  para un tiempo de funcionamiento de  $20 \text{ h d}^{-1}$ ; sin embargo, difiere de los valores obtenidos por Moreno *et al.* (2012) con hidromódulo de  $1,50 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  y  $18 \text{ h d}^{-1}$ . 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 observa que el pivote central dotado del emisor Rotator obtiene el menor caudal en el pivote de  $77,05 \text{ L s}^{-1}$ , éste se aproxima más al caudal mínimo para satisfacer las necesidades netas del cultivo de maíz en período de mayor demanda de  $70,10 \text{ L s}^{-1}$ . 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.

**Tabla 1.** Punto de operación del sistema de riego según el tipo de emisor

Parámetro	Tipo emisor			
	Boquilla difusora cubana	Spray	Rotator	Wobbler
Q (L/s)	78,74	81	77,05	79,27
H <sub>b</sub> (m)	80,67	78,7	82,10	80,21
η <sub>b</sub> (%)	81,9	81,17	82,34	81,75
P (kW)	76,08	77,04	75,37	76,30

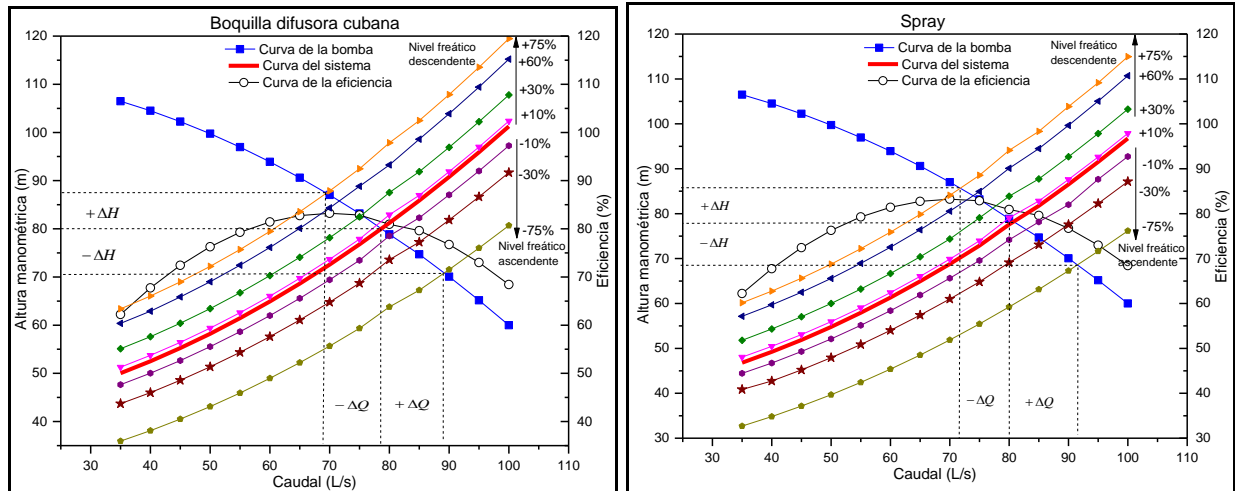
En las figuras 2 y 3 se muestran los punto de operación de las curvas características de la bomba y los niveles freáticos según tipos de emisores. Se observan como los puntos de operación se desplazan según se alteran los niveles freáticos, pero son más significativos cuando estos son ascendentes a partir 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.



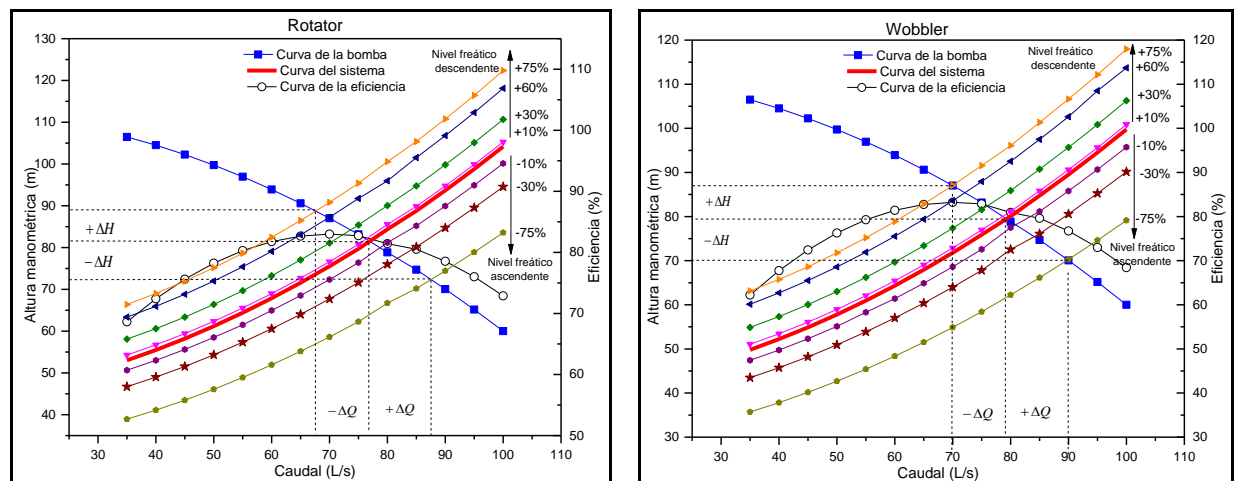


## IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018



**Figura 2.** Punto de operación en la curva característica de la bomba con el emisor boquilla difusora cubana y el Spray.



**Figura 3.** Punto de operación en la curva característica de la bomba con el emisor Rotator y Wobbler.

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%.

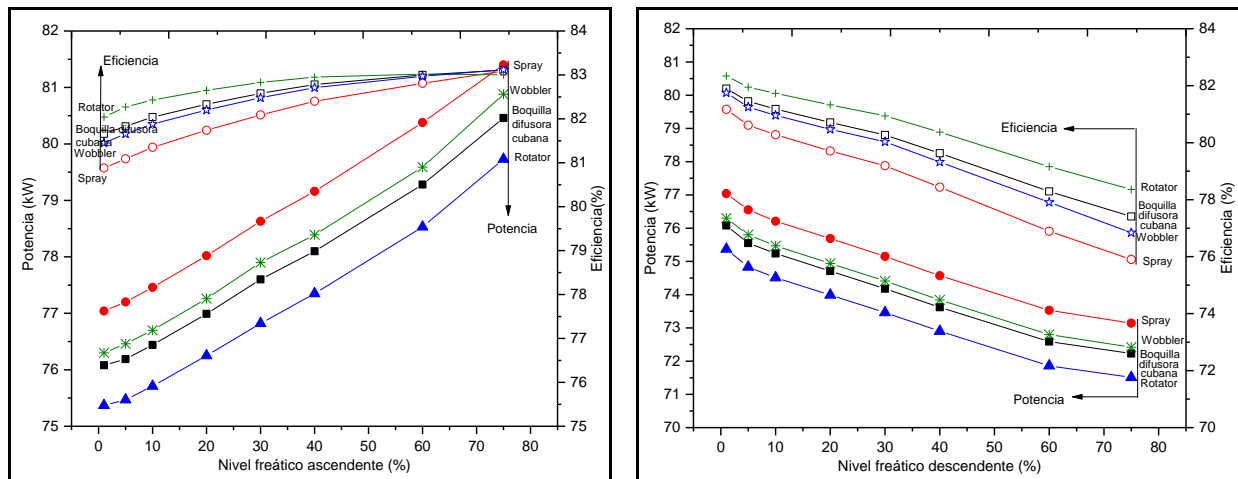
Se observa en la figura 3 que el punto de operación del sistema de riego acoplado con el emisor Wobbler se desplaza con más facilidad a partir del 10% del nivel freático ascendente, que respecto al Rotator. El caudal empleado por el pivote con emisor



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

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.

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.



**Figura 4.** La potencia y eficiencia de la bomba centrífuga en función del nivel freático del pozo.

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).

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  $8,04 \text{ mm min}^{-1}$ , superior con la emitida por la pluviosidad máxima en el extremo del lateral ( $P_{mD}$ ) para cada tipo de emisor.

**Tabla 2.** Análisis de la escorrentía en el extremo del lateral.

No.	$P_{mD}$ ( $\text{mm min}^{-1}$ )	$P_{mA}$ ( $\text{mm min}^{-1}$ )	$AM_E$ (m)	$T_d$ ( $\text{h d}^{-1}$ )	$V$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$AM_L$ (m)
Boquilla difusora cubana	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

Se confirma mediante los resultados en la tabla 2, 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  $18,89 \text{ h d}^{-1}$ .

## Conclusiones

Se desarrolló un modelo matemático 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  $1,20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  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.

## Referencias Bibliográficas

- Alazba, A.; Mattar, M.; Elnesr, M.; Amin, M. (2012). Field Assessment of Friction Head Loss and Friction Correction Factor Equations, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ISSN: 1943-4774, Volumen 138 (2): Página 166–176.
- Dillon, R. C.; Hiler, E. A.; Vittetoe, G. (1972) "Center pivot sprinkler design based on intake characteristics, *Transactions of the ASAE*, ISSN: 1943-4774, DOI: 10.13031/2013.38057, Volumen 15 (5): Página 0996-1001.
- Ferreira, L. G.; Y Assuncao, C. J. Graficbomb. (2015). Software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento, *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, Botucatu, ISSN: 1808-8546, Volumen 20 (4): Página 694-704.
- Izquier, A., Carrión, P.; Tarjuelo, J.; Moreno, M. (2015). Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain", *Biosystems Engineering*. ISSN: 1537-5110, DOI-10.1016/j.biosystemseng.2015.04.015, Volumen 135: Página 61-72.



- Köpp, M. L.; Peiter, X. M.; Robaina, D. A.; Toescher, F. C. (2016) Caracterização de estações de bombeamento em lavouras de arroz do rio grande do sul”, Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, ISSN: 1809-4430, DOI-10.1590/1809-4430, Volumen 36 (2): Página 342-351.
- López, S. M.; Mujica, C. A.; Brown, M. O.; Castellanos, C. L. (2011). Evaluación del consumo energética de las máquinas de pivote central eléctrica en la empresa cultivos varios “La Cuba”, provincia Ciego de Ávila. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, ISSN: 1010-2760, Volumen 20, (Número Especial): Página 30-37.
- Mantovani, C. E.; Bernardo, S.; Paleretti. (2012): Irrigação. Princípios e métodos, Editora UFV, 3 edição, 2da reimp, pp. 241-242, ISBN: 978-85-7269-373-8, Viçosa Brasil.
- Montero, J.; Martínez, A.; Valiente, M.; Moreno, M. A.; Tarjuelo, J. M. (2012). Analysis of water application cost with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. Springer, *Journal of Irrigation Science*, ISSN: 0342-7188, DOI-10.1007/s00271-012-0326-4, Volumen 31 (3): Página 507-521.
- Moreno, M.; Medina, D.; Ortega, J.; Tarjuelo, J. (2012) Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Management*, ISSN: 1943-4774, DOI- 10.1016/j.agwat.2012.01.016, Volumen 107: Página 112-121.
- Pérez, L. R. (2003). Nuevos criterios metodológicos y tecnológicos para el diseño hidráulico y la operación de máquinas de riego de pivote Central. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.
- Pérez, L. R Y Martínez, G. Y. (2004). 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*, ISSN: 0186-4076, Volumen 19 (2): Página 89-100, 2004.
- Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E; Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Riego y Drenaje No 66*, FAO: Roma, Italia. E-ISBN 978-92-5-308564-4, 2012.
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología, Editorial Mundi-Prensa, 3ª Edición., pp 256-287, ISBN: 84-8476-225-4, Madrid, España.
- Vatankhah, R. A. (2014). Full-Range Solution for the Theis Well Function. *Journal of Hydrologic Engineering*. *Journal of Hydrologic Engineering*, ISSN-1943-5584, DOI-10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0000833, Volumen 19 (3): Página, 649-653.
- Walton, W.C. (1991). *Principles of Groundwater Engineering*, Editorial Lewis Publishers, pp. 29-50, ISBN: 0873712838, Michigan, United States of America.