



Evaluación hidráulica de sistemas de riego con tuberías multicompuertas para el riego de la caña de azúcar en la Agricultura.

Néstor Méndez Jurjo,
Universidad de Ciego de Ávila
Oscar Nemesio Brown Manrique,
Delegación Municipal de la Agricultura
Manuel Eudel Palmero Espinosa,
Dayamira Mundiél Sotolongo
Universidad de Ciego de Ávila

nestorm@unica.cu, obrown@unica.cu, dayamiram@unica.cu

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la Empresa Azucarera Primero de Enero en un área ocupada por la técnica de riego por surcos con entrega de agua mediante tuberías con compuertas. Los resultados demostraron que el caudal descargado por 60 compuertas abiertas a la mitad proporciona una mayor uniformidad en los caudales que aportan las compuertas a lo largo del conducto. La carga de presión sobre la compuerta puede ser estimada mediante un modelo exponencial con alto coeficiente de determinación. Los polinomios deducidos para la estimación del coeficiente p y el exponente r de la función potencial de avance demostraron consistencia en la simulación de la fase de avance del riego por surcos. Los valores promedios de los parámetros geométricos del surco pueden utilizarse con seguridad en el diseño del riego por surcos. La curva de recesión puede simularse adecuadamente a partir del modelo lineal tipo $t_r = m_r x + t_{r1}$ para las condiciones de suelos, caudales, pendientes y longitudes de surcos evaluados en este trabajo. Los polinomios de tercer orden y el valor promedio de la pendiente de la curva de recesión producen una buena estimación de la fase de recesión del riego por surcos.

Palabras Claves: Evaluación, Riego, Tuberías Multicompuertas, Caudales, Curva de Recesión

SUMMARY

The investigation was developed in the Sugar Enterprise Primero de Enero in an area occupied by the furrows irrigation technique with delivery of water by means of

pipes with floodgates. The results demonstrated that the flow discharged in half by 60 open floodgates provides a bigger uniformity in the flows that contribute the floodgates along the conduit. The load of pressure on the floodgate can be estimated by means of an exponential model with high coefficient of determination. The polynomials deduced for the estimate of the coefficient p and the exponent r of the potential function of advance demonstrated consistency in the simulation of the phase of advance of the watering for furrows. The values averages of the geometric parameters of the furrow can be used with security in the design of the watering for furrows. The recession curve can be simulated appropriately starting from the pattern lineal type $t_r = m_r x + t_{r1}$ for the conditions of floors, flows, slopes and longitudes of furrows evaluated in this work. The polynomials of third order and the value average of the slope of the recession curve produce a good estimate of the recession phase of the furrows irrigation.

Keywords: Evaluation, irrigation, pipes multiflood gate, flows, recession curve



INTRODUCCIÓN

La importancia incuestionable que tiene el agua para la vida en la tierra es demostrada, al reafirmar que la vida en este planeta tuvo su origen en el agua, la cual permitió junto con el dióxido de carbono y algunos nutrientes esenciales la formación de células, algunas de las cuales lograron producir su propio alimento a partir de la radiación solar; permitiendo posteriormente el proceso evolutivo constante de estos pequeños organismos hacia otras formas de vida más evolucionadas.

El riego superficial tiene la potencialidad de usar eficientemente el agua y los recursos energéticos; también mantener en un nivel elevado el rendimiento de los cultivos. Esto justifica la difusión que ha tenido el riego por gravedad; que además ha podido demostrar sus posibilidades bajo muchas circunstancias: requerimiento bajo de energía y simplicidad de sus operaciones. Para que pueda cumplirse la potencialidad de estos sistemas, los mismos deben ser diseñados y operados correctamente, pues en la mayoría de los casos las deficiencias que persisten en estos aspectos constituyen la causa de las pérdidas excesivas de agua por percolación profunda y por escurrimiento superficial en el extremo aguas abajo del surco (Brown, 2000).

El riego por surcos se compone de cuatro fases: (1) fase de avance, (2) fase de almacenamiento, (3) fase de consumo y (4) fase de recesión (Pérez, 1995).

De acuerdo con Strelkoff (1977) la fase de avance comienza cuando el agua se introduce en el extremo superior del surco y el frente de humedecimiento se mueve aguas abajo del mismo hasta que alcanza su extremo inferior. Esta fase es la que presenta mayor interés porque es la responsable de la desuniformidad en la distribución del agua infiltrada en la sección final del surco (Elliott et al. 1982).

En la mayor parte de las observaciones de campo la longitud de recesión contra el tiempo es una relación lineal. Walker y Humpherys, (1983).

Brown (2000) al referirse a las principales dificultades que afectan el funcionamiento del riego por surcos hace énfasis en la baja calidad constructiva de los sistemas y las deficiencias de su diseño y manejo. En general los sistemas en riego por gravedad trabajan comúnmente con eficiencias de aplicación muy bajas, lo cual impide incrementar la superficie bajo riego; sin embargo los investigadores de este tema coinciden en que la modernización del riego superficial es la vía para incrementar su eficiencia y rentabilidad.

El riego superficial experimenta un avance extraordinario como consecuencia de la experiencia de muchos investigadores del mundo, expresado en el desarrollo de modelos de simulación, tecnologías avanzadas y la utilización de dispositivos para la automatización de este método de riego (Brown, 2000).

La aplicación de agua es la relación entre la lámina de agua almacenada en la zona radicular y la lámina de agua derivada, representada ésta por la sumatoria de la lámina neta, escurrida y percolada. Esta ve así afectada por las pérdidas por escurrimiento y percolación profunda (Israelsen y Hansen, 1965).

Para lograr un riego eficiente se deben considerar: el caudal de entrada en la cabecera del surco y el tiempo de riego necesarios para que el agua llegue al final del surco en la cantidad deseada. Una forma de mejorar la eficiencia de este sistema es colocar una válvula pulsadora para que el agua aplicada en forma discontinua penetre en el suelo en forma más eficiente (INTA, 2001).

La válvula de riego por impulsos, producida por P&R Surge Systems mejora sensiblemente la eficiencia del sistema de compuertas. Adicionalmente, ofrece la posibilidad de implementar el fertirriego, reduciendo notablemente el uso de fertilizantes y optimizando su aplicación (Colpozos, 2008).

Los esfuerzos por alcanzar altas eficiencias de aplicación en los sistemas de riego por surcos están limitados por la amplia variación espacial y temporal de las características de infiltración del suelo (Elliott y Walker, 1982).

Según Utah State University (1989), el riego por intermitencia es la aplicación de agua en surcos de riego con una proporción de flujo intermitente el cual produce series de cargas hidráulicas o impulsos. El riego intermitente fue desarrollado en la Universidad de Utah como un intento de producir riego de remojo automatizado.

Uno de los más relevantes resultados reportados es la reducción del tiempo de avance para intermitencia comparado con el riego convencional (Bishop, 1981).

El riego intermitente ha sido definido como la aplicación intermitente de agua para riego en surcos o bandas, creándose series de encendidos y apagados de tiempos constantes o variables (Phillip, et al, 1982).

Pacheco y col. (1995) consideran que los parámetros fundamentales del riego intermitente son: El caudal del surco, el número de impulso durante la fase de avance, la duración de cada impulso y el tiempo entre impulso. La óptima combinación resultará la del mayor avance logrado con el menor volumen de agua.



García 1996, expresa que el riego por impulso está basado en un sistema de descarga intermitentes, las cuales son controladas por un dispositivo que administra y suministra el agua a la parcela. Normalmente dicho dispositivo de control es una válvula automatizada que se adapta al hidrante de un sistema de tubería con compuertas. Su fuente de alimentación es un sistema de bombeo a baja presión.

MATERIAL Y METODOS

Localización del experimento

La investigación se desarrolló en una parcela sembrada de caña de azúcar de la variedad

C-120 localizada en el bloque 609 de la UBPC Albio Hernández de la Empresa azucarera Primero de Enero. El área se ubica entre las coordenadas 774.100 - 775.100 N y 247.00 - 248.00 E, con una superficie de 35 hectáreas.

El tipo de suelo predominante es el ferralítico rojo compactado en una superficie que presenta una topografía no uniforme con depresiones y elevaciones en el interior de los campos en el sentido de los surcos; siendo necesario seleccionar las áreas de mejores condiciones para su estudio.

La fuente de abastos es subterránea y se ubica en el sector Hidrológico CA 1-12, con un nivel estático y dinámico de 7.50 m y 8.30 m respectivamente, lo que garantiza un caudal de extracción superior a 200 l/s a partir de un pozo de 500 mm diámetro y profundidad 25.0 m. La calidad del aguas es buena con un nivel promedio de sales solubles totales (SST) de 0.10 g/L.

Características del sistema de riego.

El sistema de riego empleado es del tipo riego por surcos mediante tuberías multicompuertas que consiste en la utilización de una tubería de diámetro 315 mm de PVC, soterrada en un longitud total de 1000 m y en la cual se colocan dos hidrantes separados entre sí. Esta tubería es soterrada y sale directamente de la estación de bombeo con una longitud máxima de 500 m en el sentido paralelo a los surcos cabecera del bloque, lugar donde se encuentra la guardarraya de 10 m. En este punto se coloca el hidrante, que permite continuar con 500 m adicionales, donde se coloca el segundo hidrante, exactamente en la intercepción con la guardarraya transversal de 10m en el centro del bloque.



Figura. 1 Tubería de conducción soterrada e hidrante.

Para la entrega de agua a los surcos, se usa una tubería de PVC con diámetro 280 mm, la cual tiene compuertas regulables cada 1.50 m para la descarga del caudal en el surco (figura 2). Esta tubería toma el agua desde el hidrante con una longitud de 100 m.



Figura. 2 Tubería de riego con compuertas regulables.

Análisis de perfil transversal y longitudinal del terreno.

Los perfiles transversal y longitudinal se determinó mediante el levantamiento planimétrico y altimétrico del área de estudio a lo largo de la línea donde se coloca la tubería multicompuertas y en los surcos donde se evaluó el avance, la recesión y la infiltración del agua considerándose tres grupos de surcos en los extremos de la parcela de riego y en el centro de la misma conformados por tres surcos cada uno.



En el análisis del perfil transversal del terreno el estacionado se hizo cada 25 metros y el análisis del perfil longitudinal del surcos las estaciones se colocaron convenientemente a distancias de 30, 72, 100, 144, 180 y 216 m desde la cabecera del surco, teniéndose en cuenta las dificultades que ofrecía el cultivo establecido para el desarrollo de estas labores.

Determinación del caudal del surco.

El caudal de agua se determinó a la salida de las compuertas con los siguientes materiales y equipos:

- Cronometro digital.
- Cubeta plástica de 10 litros.
- Probeta graduada de 1 litro.
- Bolsa de plástico de baja densidad para capturar el volumen de agua en el punto de salida.

Las pruebas se realizaron en la compuerta inicial, la compuerta intermedia y la compuerta final teniendo en cuenta dos condiciones de manejo de la tubería de riego:

- Compuertas totalmente abiertas: 30 compuertas.
- Compuertas abiertas a la mitad: 60 compuertas.

El procedimiento consistió en colocar la cubeta debajo del agua descargada por la compuerta seleccionada y se midió con el cronometro digital el tiempo requerido para llenarse la cubeta empleada (figura 3). El volumen capturado se midió con la probeta graduada. El proceso se repitió cinco veces en cada una de las compuertas evaluadas.



Figura 3 Determinación del caudal del surco

Determinación de la carga de presión sobre la compuerta.

La carga de presión en diferentes puntos a lo largo de la tubería se determinó con la utilización de un piezómetro con los siguientes materiales:

- Manguera de PVC transparente con diámetro de 10 mm.
- Regla de madera con altura de 2.30 m.
- Cinta métrica.

La manguera se colocó de forma recta y fija sobre la regla de madera, utilizándose la cinta métrica para medir las diferentes lecturas de columna de agua dentro de la manguera a partir del centro de la compuerta. El proceso se realizó en los mismos puntos en que se midió el caudal casi de forma simultánea para la obtención de pares de datos de caudal descargado por la compuerta y carga de presión sobre la compuerta.

El procedimiento consistió en retirar la compuerta de la tubería y colocar una faja de goma gruesa con un pequeño orificio por donde se introdujo un extremo de la manguera del piezómetro con mucho cuidado para evitar derrame de líquido; así como caída de presión. La utilización de una liga de caucho permitió lograr la total hermeticidad, luego se procede a la obtención de la lectura, después del tiempo requerido para la estabilización de la columna de agua. El procedimiento se repite en el resto de las compuertas seleccionadas.



Velocidad del agua en la tubería multicompuertas.

La velocidad de circulación del flujo de agua dentro de la tubería multicompuertas se determinó a partir de la ecuación fundamental de derrame de líquido a partir de un orificio:

$$v = \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:

μ : Coeficiente que tiene en cuenta la forma del orificio. Se recomienda (0.64).

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h : carga de presión sobre el orificio (m).

Determinación de modelos matemáticos de ajuste.

Los datos experimentales se ajustaron a funciones de tipo lineal, potencial y polinomial a partir del Microsoft Office Excel 2007. Los modelos estadísticos matemáticos empleados fueron:

- Cotas del terreno en función de la distancia en las direcciones transversal y longitudinal.
- Caudal de descarga de las compuertas en función de la longitud de la tubería.
- Carga de presión sobre la compuerta en función del caudal.
- Carga de presión sobre la compuerta en función de la longitud de la tubería.
- Caudal de descarga de las compuertas en función de la carga de presión sobre la compuerta.
- Caudal del surco en función de la pendiente longitudinal de la parcela.

Determinación de modelo de avance

El modelo de avance se determinó mediante el ajuste de los datos experimentales de longitud y tiempo de avance a la siguiente ecuación potencial:

$$x = pt^r$$

Dónde:

x : Distancia de avance del flujo de agua (m).

t: Tiempo de avance del flujo de agua (min.).

p, r: Parámetros de ajuste del modelo potencial.

Determinación de modelo de recesión

El modelo para la estimación de la recesión del agua en el surco se determinó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$tr_i = tr_1 + m_r x_i$$

$$tr_1 = t_{co} + t_c$$

$$t_c = \frac{V_c}{Q_0} = \frac{0.5A_0L}{Q_0}$$

$$A_0 = \left(\frac{Q_0 \cdot n}{60 \rho_1 S_0^{0.5}} \right)^{1/\rho_2}$$

Dónde:

tr_i: Tiempo de recesión en cada estación del surco (min.).

tr₁: Tiempo de recesión en el extremo inicial del surco (min.).

m_r: Pendiente de la curva de recesión determinada experimentalmente.

x_i: Distancia de recesión en cada estación del surco (m).

t_{co}: Tiempo de corte (min.).

t_c: Tiempo en la fase de consumo (min.).

Q₀: Caudal aplicado en el surco (m³/min).

A₀: Área hidráulica del surco (m²).

L: Longitud total del surco (m).

n: Rugosidad del surco.

S₀: Pendiente longitudinal del surco.

ρ₁, ρ₂: Parámetros geométricos del surcos determinados experimentalmente para suelos ferralíticos rojos (ρ₁ = 0.526; ρ₂ = 1.357)

El tiempo de recesión en el final del surco se determina como:



$$t_{OL} = t_r - t_L$$

Donde: t_r : Tiempo de recesión (min.) y t_L : Tiempo de avance en el extremo final del surco (min.).

El tiempo de almacenamiento se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$t_{alm} = t_{co} - t_L$$

Diseño de la tubería de riego con compuertas

Para el diseño de la tubería de riego con compuertas encargada de entregar el caudal de diseño a cada surco a través del número de aberturas consideradas, se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones:

Calculo del número de compuertas totales.

$$N_C = \frac{L_T}{w}$$

Donde

N_C : Numero de compuertas totales.

L_T : Longitud de la tubería (m).

w : Separación entre compuertas (m).

Cálculo de número de compuertas cerradas

$$N_{CC} = N_C - N_{CA}$$

Donde

N_{CC} : Número de compuertas cerradas.

N_{CA} : Número de compuertas abiertas.

Cálculo de la longitud del tramo de tubería con compuertas abiertas

$$L_A = w \cdot N_{CA}$$

Donde

L_A : Longitud del tramo de tubería con compuertas abiertas (m).

w : Separación entre compuertas (m).

N_{CA} : Número de compuertas abiertas.

Cálculo de la longitud de tubería con compuertas cerradas

$$L_C = w.N_{CC}$$

Donde

L_C : Longitud de tubería con compuertas cerradas (m).

w : Separación entre compuertas (m).

N_{CC} : Número de compuertas cerradas.

Calculo de la diferencia carga de presión entre los extremos

$$\Delta h = h_{ini} - h_{fin}$$

Donde

Δh : Diferencia carga de presión entre los extremos de la tubería de riego (m).

h_{ini} : Carga hidráulica sobre la compuerta al inicio de la tubería (m).

h_{fin} : Carga hidráulica sobre la compuerta al final de la tubería (m).

Cálculo de la diferencia de cotas entre los extremos de la tubería.

$$\Delta z = S_T \cdot L_T$$

Donde

Δz : Diferencia de cotas entre los extremos de la tubería de riego (m).

S_T : Pendiente de la tubería de riego.

L_T : Longitud de la tubería (m).

Cálculo de las pérdidas de fricción máxima.

$$hf_{max} = \Delta h + \Delta z$$

Donde

hf_{max} : Pérdidas de fricción máxima (m)

Δh : Diferencia carga de presión entre los extremos de la tubería de riego (m).

Δz : Diferencia de cotas entre los extremos de la tubería de riego (m).

Cálculo del caudal total de la tubería



$$Q = q_0 \cdot N_{CA}$$

Donde

Q: Caudal total de la tubería (L/s).

q_0 : Caudal que ingresa al surco (L/s).

N_{CA} : Número de compuertas abiertas.

Calculo de la velocidad del agua en la tubería de riego.

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot D_T^2}$$

Donde

v: Velocidad del agua en la tubería de riego (m/s). Debe estar entre 1.5-2.0 m/s.

Q: Caudal total de la tubería de riego (L/s).

D_T : Diámetro de la tubería de riego (m).

Cálculo del número de Reynolds

$$NR = \frac{v \cdot D_T}{\nu}$$

Donde

NR: Número de Reynolds.

v: Velocidad del agua en la tubería de riego (m/s). Debe estar entre 1.5-2.0 m/s.

D_T : Diámetro de la tubería de riego (m).

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s).

Cálculo del coeficiente de fricción de Blassius.

$$f = 140.315NR^{-0.9}$$

Donde

f: Coeficiente de fricción determinado por la ecuación de Blassius.

NR: Número de Reynolds.

Pérdidas de cargas por fricción.

$$hf = f \frac{L_T}{D_T} \frac{v^2}{2g}$$

Donde

hf: Pérdidas de cargas por fricción (m).

f: Coeficiente de fricción determinado por la ecuación de Blassius.

L_T : Longitud de la tubería (m).

D_T : Diámetro de la tubería de riego (m).

v: Velocidad del agua en la tubería de riego (m/s). Debe estar entre 1.5-2.0 m/s.

Cálculo de las pérdidas de cargas totales.

$$hf_T = hf + h_{loc}$$

$$h_{loc} = 0.10hf$$

Dónde:

hf_T : Pérdidas de cargas totales (m).

hf: Pérdidas de cargas por fricción (m).

h_{loc} : Pérdidas de cargas localizadas (m).

Se debe cumplir que

$$hf_T < hf_{max}$$

De no cumplirse la condición anterior, hay que rediseñar la tubería a partir de:

- Disminuir el número de compuertas abiertas.
- Incrementar el diámetro de la tubería.

Determinación del coeficiente de uniformidad de Christiansen

$$CU = 1 - \left[\left(\frac{1}{N_{CA} \cdot q_m} \right) \left(\sum q_i - q_m \right) \right]$$

$$q_i = 0.06L_{Ti} + 2.268$$

$$R^2 = 0.984$$



$$L_{Ti} = L_{Ti-1} + w$$

Dónde:

CU: Coeficiente de uniformidad de Christiansen

N_{CA} : Número de compuertas abiertas.

q_i : Caudal que aporta la compuerta en cada tramo analizado (L/s).

q_m : Caudal promedio que aporta cada compuerta (L/s).

L_{Ti} : Longitud del tramo de tubería analizada (m).

Determinación de la uniformidad de distribución

$$UD = \frac{4 \sum q_{inf}}{N_{CA} \cdot q_m}$$

Dónde:

UD: Uniformidad de distribución.

N_{CA} : Número de compuertas abiertas.

Σq_{inf} : Suma de caudales que descarga el cuarto inferior de la tubería (L/s).

q_m : Caudal promedio que ingresa al surco (L/s).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del caudal del surco.

En la Tabla 3.1 se muestra el caudal del surco, considerando 60 compuertas abiertas totalmente, demuestra que se producen notables diferencias entre las descargas al inicio, medio y final de la tubería multicompuertas, las causas de estas diferencias se explican a partir de la energía del fluido que es mayor al inicio del tramo analizado, por lo que el agua puede fluir con mayor velocidad por una sección transversal invariable, haciendo que el caudal sea mucho mayor. Al final de la tubería las pérdidas que se generan reducen la energía y la velocidad, consecuentemente el caudal es notablemente inferior en el extremo final del conducto.

Tabla 1: Caudal de las compuertas.

Caudal descargado por la compuerta q (L/s)		
Inicio	Medio	Final
5,11	3,06	0,73
5,11	4,12	0,66
5,29	3,73	0,66
5,29	3,61	0,66
5,26	3,63	0,66
5,21	3,63	0,67

Este Comportamiento puede observarse en la figura 3.1 para las compuertas evaluadas al inicio (0 m) en el medio (49 m) y al final (88.50 m) donde se obtiene modelo lineal que ajusta adecuadamente los valores de caudal descargado por la compuerta respecto a la distancia a partir del inicio de la tubería:

$$q = -0.046L + 5.44$$

$$R^2 = 0.970$$

Donde

q – caudal descargado por la compuerta (L/s).

L - Longitud de la tubería multicompuerta hasta la compuerta de análisis (m).

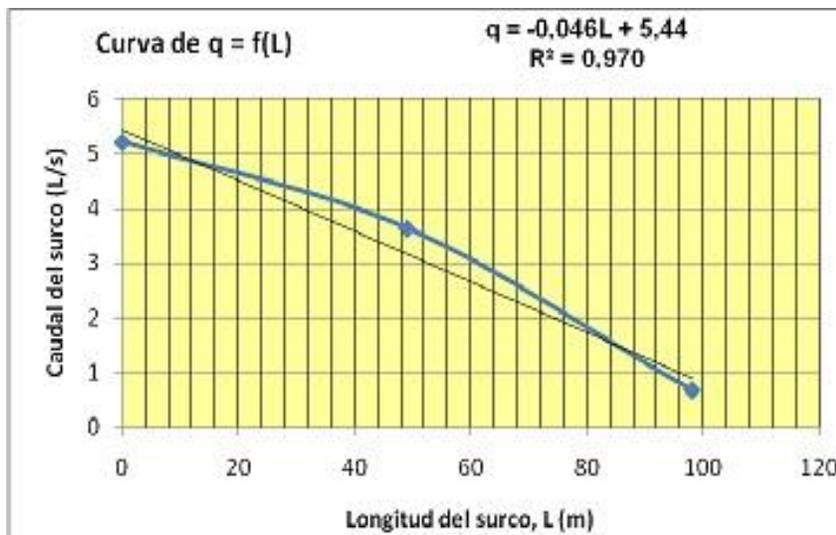


Figura 4. Caudal de la compuerta a lo largo de la tubería.

En el caso del caudal descargado por 60 compuertas abiertas a la mitad, la causas que provocan las diferencias de caudales a lo largo de la tubería se mantienen; aunque se observa una mayor uniformidad, debido a que el área de descarga de la compuerta se reduce, haciendo que el caudal que puede ser evacuado por las primeras compuertas sea menor.



Se ha demostrado hidráulicamente que en las tuberías con salidas múltiples las mayores variaciones de caudales se produce en el primer cuarto de la tubería, posteriormente estas diferencias disminuyen significativamente.

Tabla 2 Caudal de las compuertas.

Caudal descargado por la compuerta q (L/s)		
Inicio	Medio	Final
4,55	4,22	3,55
4,37	4,00	3,55
4,27	3,89	3,56
4,41	3,99	3,51
4,09	4,00	4,00
4,34	4,02	3,63

En la figura 5 muestra que la relación funcional entre el caudal descargado por la compuerta a diferentes distancias responde acertadamente a un modelo lineal:

$$q = -0.006L + 2.268$$

$$R^2 = 0.984$$

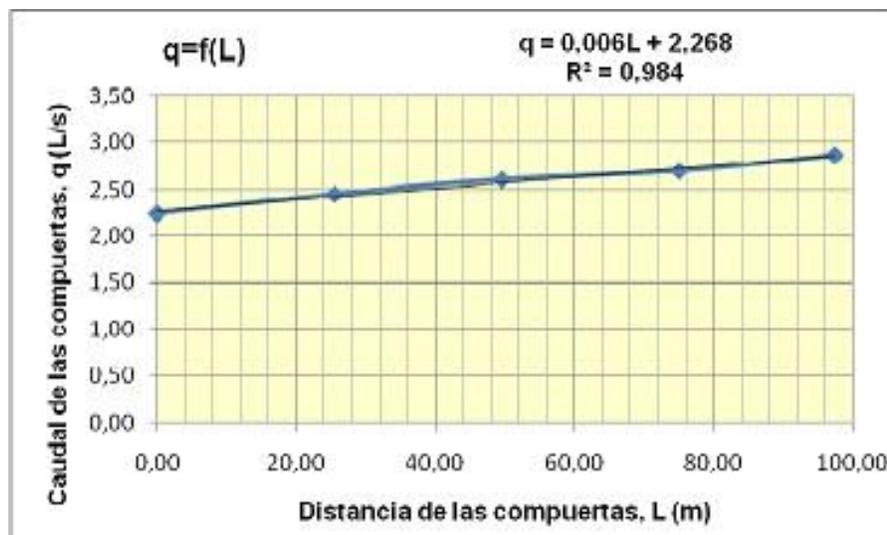


Figura 5. Caudal de la compuerta a lo largo de la tubería

El análisis de todas las compuertas juntas, considerando la condición de 60 compuertas abiertas totalmente y 60 compuertas abiertas a la mitad permite deducir un modelo polinomial de segundo orden para la estimación del caudal descargado por la compuerta a diferentes distancias a partir del inicio de la tubería. En este caso el coeficiente de determinación es más bajo que en los casos anteriores, debido a la mayor dispersión de los datos; no obstante se puede utilizar de forma práctica; pues los valores que se obtienen están dentro del rango esperado:

$$q = -0.0001L^2 + 0.008L + 4.533$$

$$R^2 = 0.720$$

A partir de la ecuación anterior se generan valores de caudales en casa unas de las 60 compuertas abiertas espaciadas cada 1.50 m que se muestra en la siguiente tabla 3.3 para una longitud de tubería de 100 m.

En la figura 6 se muestra la relación existente entre el caudal a la salida del surco en función del caudal de las compuertas.



Figura 6 Caudal a la salida del surco en función del caudal de las compuertas.

**Tabla 3.** Caudales de 60 compuertas en la longitud de 100 m

L (m)	q (L/s)						
0,00	4,35	22,50	4,19	45,00	4,04	67,50	3,88
1,50	4,34	24,00	4,18	46,50	4,03	69,00	3,87
3,00	4,33	25,50	4,17	48,00	4,02	70,50	3,86
4,50	4,32	27,00	4,16	49,50	4,00	72,00	3,85
6,00	4,31	28,50	4,15	51,00	3,99	73,50	3,84
7,50	4,30	30,00	4,14	52,50	3,98	75,00	3,83
9,00	4,29	31,50	4,13	54,00	3,97	76,50	3,82
10,50	4,28	33,00	4,12	55,50	3,96	78,00	3,81
12,00	4,27	34,50	4,11	57,00	3,95	79,50	3,79
13,50	4,26	36,00	4,10	58,50	3,94	81,00	3,78
15,00	4,25	37,50	4,09	60,00	3,93	82,50	3,77
16,50	4,24	39,00	4,08	61,50	3,92	84,00	3,76
18,00	4,23	40,50	4,07	63,00	3,91	85,50	3,75
19,50	4,21	42,00	4,06	64,50	3,90	87,00	3,74
21,00	4,20	43,50	4,05	66,00	3,89	88,50	3,73

Carga de presión sobre la compuerta.

La carga de presión sobre la compuerta representa la energía expresada en columna de agua que actúa a lo largo de la tubería de salidas múltiples e influye decisivamente en la magnitud del caudal que se deriva en cada tramo de conducto. En la figura 7 se observa un decrecimiento de la carga de presión

en la medida en que se incrementa la distancia. Esta variación es más notable en los primeros 20 metros; pues posteriormente se torna gradual.

El valor de la carga de presión sobre la compuerta puede ser estimado mediante un modelo exponencial con alto coeficiente de determinación:

$$h = 0.926e^{-0.0127L}$$

$$R^2 = 0.955$$

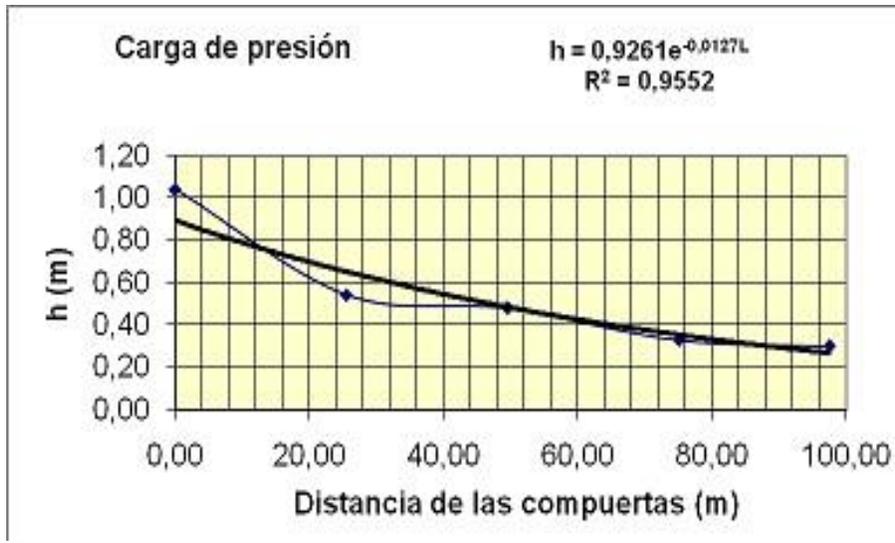


Figura 7. Variación de la carga de presión respecto a la distancia.

El valor de la carga de presión sobre la compuerta también se puede determinar a partir del caudal descargado por la compuerta (figura 8) mediante un modelo potencial con alto coeficiente de determinación:

$$h = 57.39q^{-5.06}$$

$$R^2 = 0.949$$

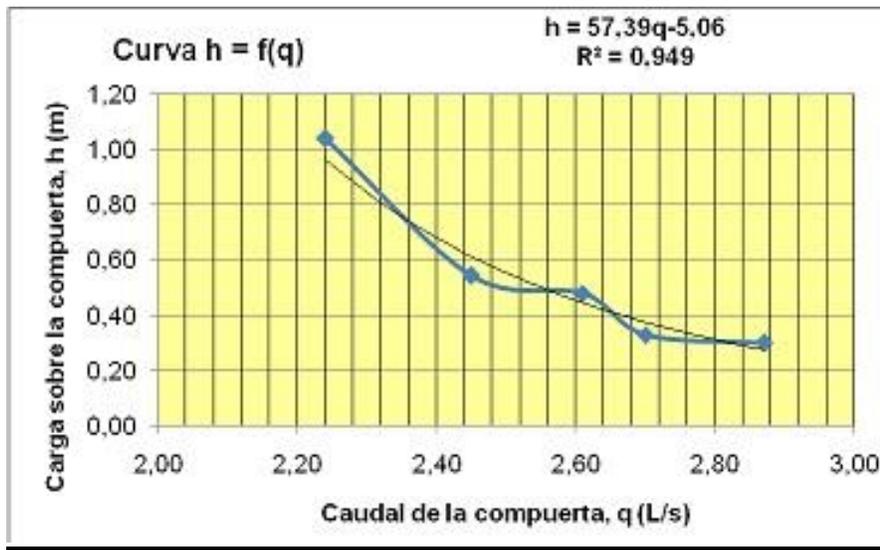


Figura 8. Variación de la carga de presión respecto al caudal de la compuerta.

Si se conoce el valor de la carga de presión sobre la compuerta es posible estimar el caudal que aporta la compuerta teniendo en cuenta la estrecha relación existente entre estas dos variables que se expresa matemáticamente mediante la siguiente función potencial:

$$q = 2,239h^{-0,18}$$

$$R^2 = 0,949$$

En la Figura 9a se muestra el comportamiento del caudal de las compuertas respecto a la carga de presión que se ejerce.

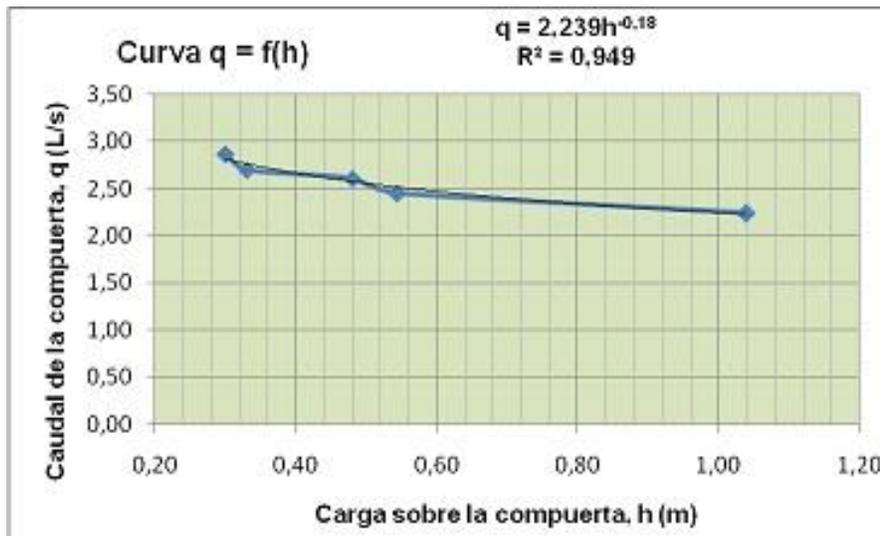


Figura 9 a: Variación del caudal de la compuerta respecto a la carga de presión.

Si se conoce la pendiente longitudinal de la parcela de riego, se puede estimar el caudal de diseño del surco, considerándose la estrecha relación existente entre estas dos variables (figura 9b) que se expresa matemáticamente mediante la siguiente función potencial:

$$q = -32624S_o^2 - 81.10S_o + 3.124$$
$$R^2 = 0.962$$

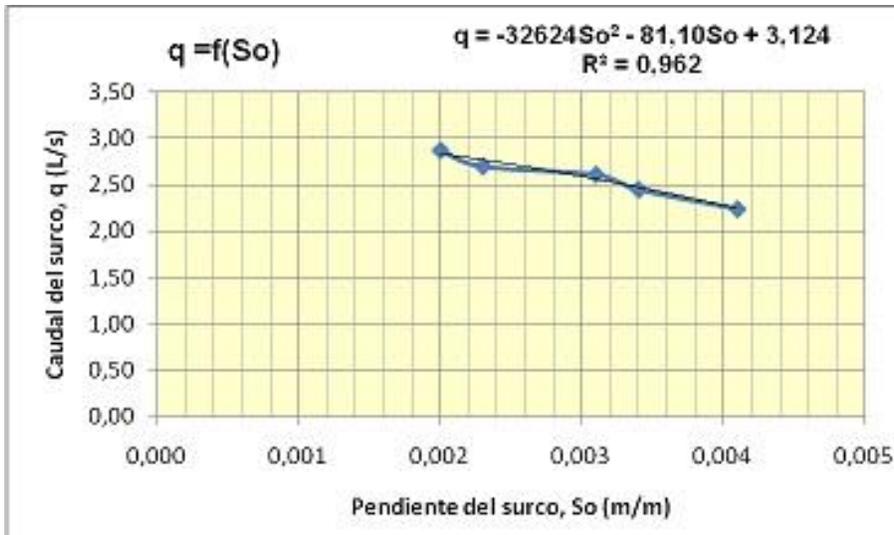


Figura 9 b. Caudal del surco respecto a la pendiente longitudinal de la parcela.

Velocidad del agua en la tubería multicompuerta.

La velocidad del agua dentro de la tubería multicompuerta puede determinarse a partir de la carga de presión sobre la compuerta y el caudal descargado por la compuerta. La relación grafica entre estas variables se muestra en las figuras 10 y 11 que a continuación relacionamos. En ambos caso se deduce una función potencial con alto coeficiente de determinación:

$$v = 2.834h^{-0.5}$$
$$R^2 = 0.999$$

$$q = 21.47h^{-2.53}$$
$$R^2 = 0.949$$

Dónde:

v - velocidad del agua dentro de la tubería multicompuerta (m/s).



h - Carga de presión sobre la compuerta (m).

q - Caudal descargado por la compuerta (L/s).

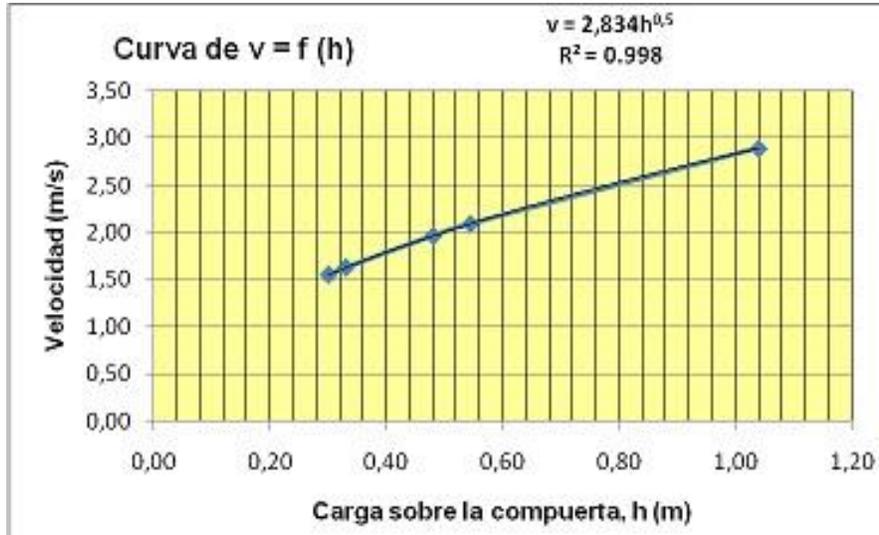


Figura 10. Velocidad del agua respecto a la carga sobre la compuerta

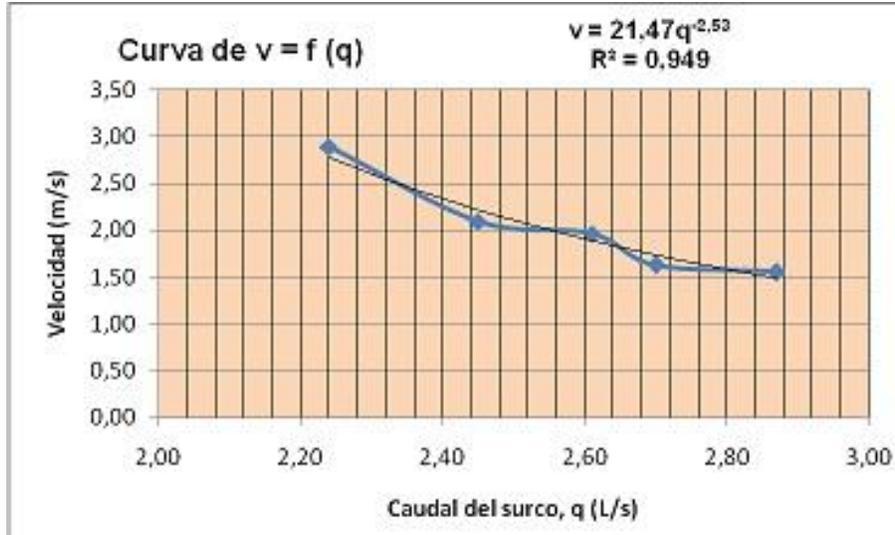


Figura 11. Velocidad del agua en la tubería respecto al caudal de la compuerta

Análisis del avance del agua sobre el surco.

En las figuras 12, 13 y 14 se muestra el comportamiento de la curva de avance del agua en el surco para caudales de 2.24 L/s, 2.61 L/s y 2.87 L/s respectivamente. En todos los casos se observa que

la relación entre distancia y tiempo de avance puede ajustarse adecuadamente a un modelo polinomial de segundo grado, con un elevado coeficiente de determinación superior al 90%, lo que indica una alta relación funcional entre estas dos variables.

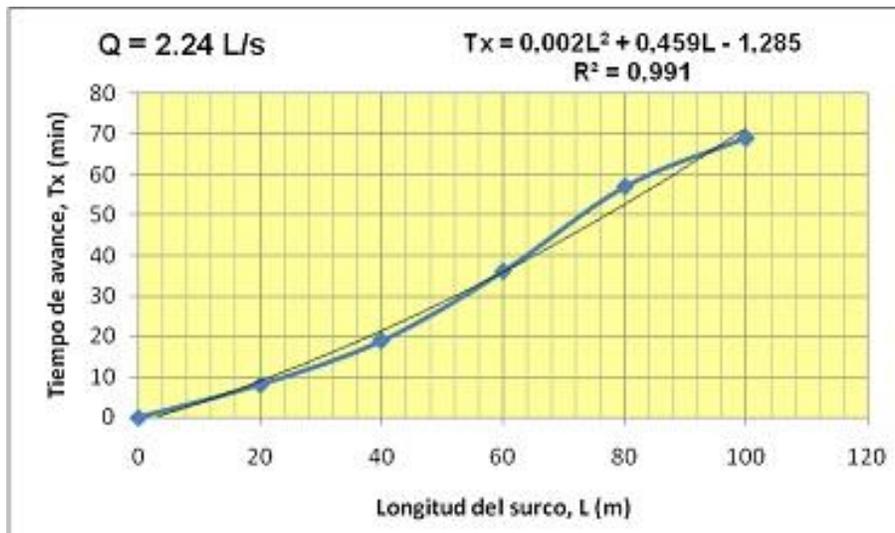


Figura 12. Curva de avance para el caudal de 2.24 L/s

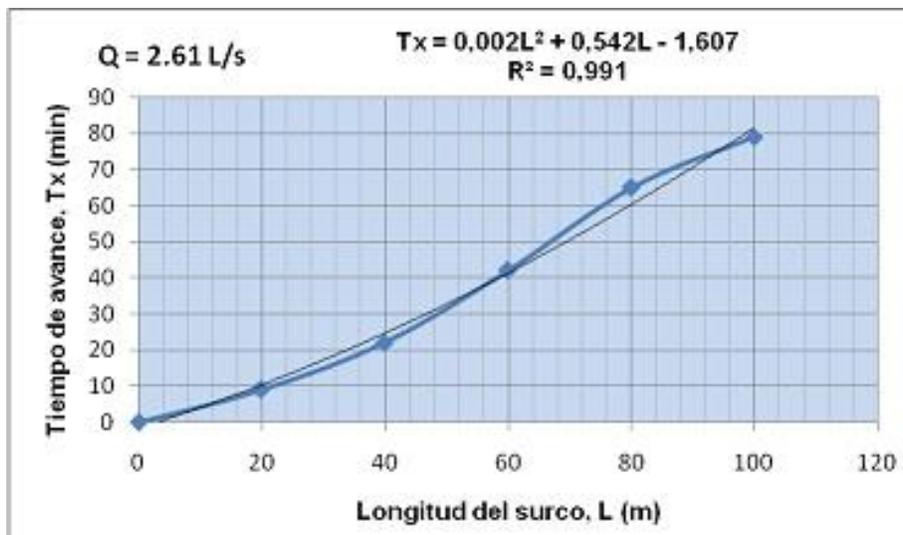


Figura 13 Curva de avance para el caudal de 2.61 L/s.

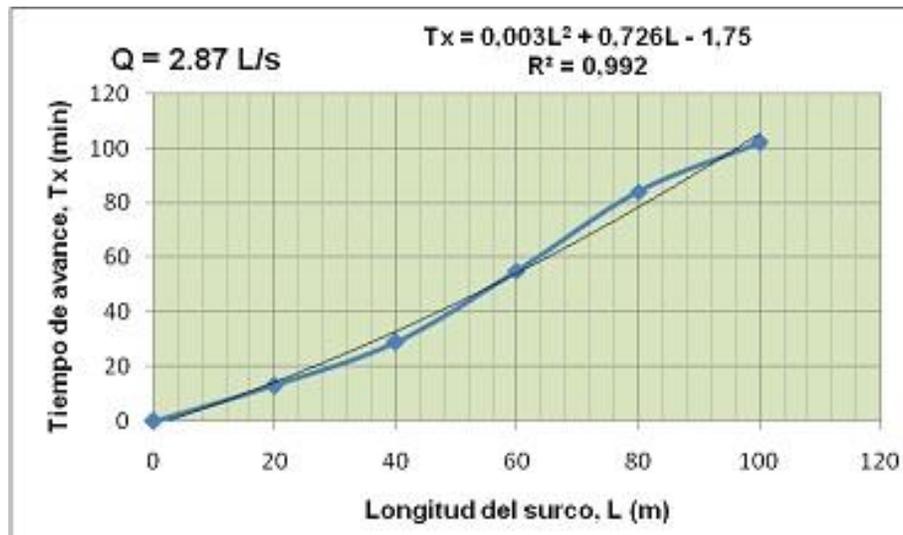


Figura 14. Curva de avance para el caudal de 2.87 L/s.

Modelos potenciales de avance

Es usual el uso de la función potencial de avance para ajustar la distancia y el tiempo de avance a un modelo estadístico matemático. En este caso se proponen modelos polinomiales de quinto orden para la determinación del coeficiente p y el exponente r de esta función:

Donde

$$x = pt^r$$

$$p = -0.012x^5 + 0.2263x^4 - 1.6946x^3 + 6.391x^2 - 12.182x + 9.4182$$

$$R^2 = 0.8262$$

$$r = -0.8215x^5 + 16.19x^4 - 126.48x^3 + 489.45x^2 - 937.97x + 713.77$$

$$R^2 = 0.8345$$

$$x = \ln\left(\frac{t_L}{Q_0}\right)$$

También se determinó el valor promedio de los parámetros de ajustes p y r para su utilización práctica en esta zona de producción cañera. Los valores promedios obtenidos fueron:

$$\bar{p} = 0.02449$$

$$\bar{r} = 1.5918$$

La utilización de esos valores en la ecuación potencial de avances permitió alcanzar valores del coeficiente de determinación (R^2) entre 0.9674 y 0.9926.

Análisis de la curva de recesión

La curva de recesión se determina a través del siguiente modelo lineal $tr_i = tr_1 + mx_i$. En este caso la pendiente se obtiene mediante la función polinomial de tercer orden que se expresa a continuación:

$$m_r = 23216x^3 + 7319x^2 - 728.72x + 27.544$$

$$R^2 = 0.9745$$

Donde

$$x = \ln(t_L)$$

También se determinó el valor promedio de la pendiente de la curva de recesión con un valor promedio de $\bar{m}_r = 0.1018$. La utilización de este resultado en la ecuación lineal de recesión permitió lograr un coeficiente de determinación entre 0.8963 y 0.9342, lo que demuestra su validez para la simulación de la curva de recesión a partir del tiempo de avance en el extremo final del surco.

Mejoramiento de la Uniformidad del riego.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del diseño del sistema de riego con tuberías multicompuertas para la condición de 60 compuertas abiertas, considerando una descarga promedio de 2.04 L/s. Se comprueba que para estas condiciones las pérdidas totales que ocurren en la tubería es de 0.50 m, inferior a las pérdidas máximas admisibles que es de 0.87 m; por lo que hidráulicamente representa un comportamiento satisfactorio.

Tabla 4. Parámetros de la tubería multicompuerta con 60 compuertas abiertas.

Datos de entrada		Resultados			
NCA	60,00	Nc	60	NR	102312,05



w (m)	1,50	N_{cc}	0	f	0,0043
D_T (mm)	254,0	L_A (m)	90,0	hf (m)	0,46
S_o	0,0014	L_C (m)	0,0	h_{loc} (m)	0,05
L_T (m)	90,0	Δh (m)	0,74	hf_T (m)	0,50
C	130	ΔZ (m)	0,13		
q_o (L/s)	2,04	hf_{max} (m)	0,87		
h_{ini} (m)	1,04	Q (L/s)	122,40		
h_{fin} (m)	0,30	v (m/s)	2,42		

En la tabla 5 se presentan los resultados de los parámetros que permiten determinar el coeficiente de uniformidad y la uniformidad de distribución. Se demuestra que el diseño propuesto logra un coeficiente de uniformidad de 93.3 % con una uniformidad de distribución del 89.9 %, los cuales se consideran satisfactorios para estas condiciones.

Tabla 5 : Parámetros del coeficiente de uniformidad y uniformidad de distribución.

N_{CA}	L_T (m)	q_i (L/s)	h (m)	I_{q_i - q_mI}
1	0,0	2,27	0,93	0,266
10	13,5	2,19	0,78	0,185
20	28,5	2,10	0,64	0,095
30	43,5	2,01	0,53	0,004
40	58,5	1,92	0,44	0,086
50	73,5	1,83	0,36	0,176
60	88,5	1,74	0,30	0,266

Σ		120,15	33,36	8,100
Promedio		2,00	0,56	
N_{CA}·q_m		120,15		

En la 6 tabla se muestran los resultados del diseño del sistema de riego con tuberías multicompuertas para la condición de 30 compuertas abiertas. Para estas condiciones se logra un ligero mejoramiento del coeficiente de uniformidad al obtenerse un valor de 96.8 %; pero la uniformidad de distribución disminuye ligeramente a un 88.8 %.

Tabla 6. Parámetros de la tubería multicompuerta con 30 compuertas abiertas.

N_{CA}	L_T (m)	q_i (L/s)	h (m)	I_{qi} - q_mI
1	0,0	2,27	0,93	0,130
10	13,5	2,19	0,78	0,049
20	28,5	2,10	0,64	0,041
30	43,5	2,01	0,53	0,131
Σ		64,13	21,34	2,025
Promedio		2,14	0,71	
N_{CA}·q_m		64,13		

CONCLUSIONES

El caudal de las compuertas considerándose 60 compuertas abiertas totalmente, muestra notables diferencias entre las descargas al inicio, medio y final de la tubería multicompuertas; sin embargo, en el caso del caudal descargado por 60 compuertas abiertas a la mitad se obtiene una mayor uniformidad en los caudales que aportan las compuertas a lo largo del conducto.

El valor de la carga de presión sobre la compuerta puede ser estimado mediante un modelo exponencial con alto coeficiente de determinación. Este parámetro permite estimar de forma indirecta la magnitud del caudal y la velocidad del agua en cada punto de la tubería multicompuertas.



Las funciones polinómicas deducidas para la estimación del coeficiente p y el exponente r de la función potencial de avance, ha demostrado consistencia en la simulación de la fase de avance del riego por surcos.

Los valores promedios de los parámetros geométricos del surco $\rho_1 = 0.539$ y $\rho_2 = 1.361$ pueden utilizarse con seguridad en el diseño del riego por surcos.

Los valores promedios de los parámetros geométricos del surco en suelos ferralíticos $\rho_1 = 0.539$ y $\rho_2 = 1.361$ pueden utilizarse con seguridad en el diseño del riego por surcos.

La curva de recesión puede simularse adecuadamente a partir del modelo lineal tipo $t_r = m_r x + t_{r1}$ para las condiciones de suelos, caudales, pendientes y longitudes de surcos evaluados en este trabajo.

El empleo del modelo polinómico de tercer orden o el valor promedio de la pendiente de la curva de recesión $m_r = 0.1018$ produce una buena estimación de la fase de recesión del riego por surcos.

REFERENCIAS

- Bishop, A. A; Walker, W. R; Allen, N. L; y Poole, G. J. (1981) "Furrow advance rate under surge flow systems." Journal of the irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. No. IR3 paper 16502: 257-263.
- Brown, O. (2000) "Aplicación de la ecuación de balance de volumen en el diseño y evaluación del riego por surcos." Tesis de Maestría en Ingeniería de Riego y Drenaje. Centro de Estudios Hidrotécnicos. Universidad de Ciego de Avila, Cuba.
- Colpozos.: "El fertirriego en sistema de riego con tuberías multicompuertas". Disponible en www.colpozos.com/riego.html. Abril del 2008. Consultado en febrero del 2015.
- Elliott, R. L; Walker, W. R; y Skogerboe, G. V. (1982) "Zero Inertia modeling of furrow irrigation advance". Journal Irrigation and Drainage. Division ASCE, 108 (3): 179- 195.
- García, J; Dehoguez, E. y Tzenova, Liliana (1996a) " El riego." Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. Cuba.
- García, N. H; Barrios, J. N; Patiño, C; Pacheco, E. y Brown, O. (1996b) " I Curso Taller Internacional de riego por gravedad IMTA-UNICA." Centro de Estudios Hidrotécnicos. Universidad de Ciego de Ávila
- Israelsen, O. W. y Hansen, V. E. (1965) " Principios y applications del riego. Segunda edición. Editorial Reverte. S.A. México.

INTA.: “Riego por surcos con caudal intermitente”. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/producto/riego/surco2.htm>. Septiembre de 2001. Consultado en febrero de 2015.

Utah State University (1989). SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Software). Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan Utah, USA.

Pacheco, J; Alonso, N; Pujol, P; y Camejo, L. E. (1995) “Riego y drenaje.” Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana, Cuba.

Pérez, Hernández, R. (1995) “Metodología para la evaluación del riego por surcos.” Centro Nacional de Capacitación Azucarera. Ciudad de la Habana. Cuba.

Walker, W .R; y Humpherys, A. S. (1983) “Kinematic wave furrow irrigation model”. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 109 (4): 377-392.