

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL DRENAJE SOTERRADO EN ÁREAS ARROCERAS

HYDRAULIC EVALUATION OF SUBSURFACE DRAINAGE IN RICE FIELDS

Julián Herrera-Puebla^{1*}; Román Pujol-Ortiz¹; Gilberto de Jesús López-Canteñs²; Greco Cid-Lazo¹; Roberto Alarcón-Licea¹; Eduardo Espinosa¹

¹Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, Ministerio de la Agricultura. Ave Camilo Cienfuegos y Calle 27, Arroyo Naranjo, C. Habana, Cuba.

²Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. MÉXICO.

Correo-e: HYPERLINK "mailto:julian@iird.cu" julian@iird.cu (*Autor responsable)

RESUMEN

En la zona norte de la provincia Granma, Cuba, la salinidad de los suelos es una limitante para la consecución de altos rendimientos en el arroz. Esta zona se caracteriza por la escasa precipitación, los niveles freáticos someros (1.5-2.5 m) y fuertemente mineralizados ($4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), lo que hace imprescindible el drenaje para el control de la salinidad. Por ello, se ensayó durante tres años, en un lote piloto de 6.5 ha, el drenaje soterrado para controlar la salinidad del suelo. Los drenes fueron espaciados a 30 y 100 m en trincheras de 1.3 m de profundidad con relleno de cáscara de arroz en el fondo. Durante las lluvias, estos drenes evacuaron el 11.2 y el 6.0 % de la precipitación, respectivamente; sin embargo, cuando el nivel freático se mantuvo por debajo del dren, la descarga fue casi constante y con valores de $0.05 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ en el dren de 30 m y de $0.014 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ en el de 100 m. Con el riego, las descargas de los drenes fueron similares en ambos espaciamientos y alcanzaron valores promedios de $1.63 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$. En condiciones de régimen no permanente, que se corresponde con el período de no riego, se demostró la validez de la ecuación de Glover-Dumm, y con ella se obtuvo un valor mediano de K que osciló entre $0.2\text{-}0.5 \text{ m}\cdot\text{día}^{-1}$. Ambos espaciamientos, al permitir un lavado del suelo e impedir que en la época de barbecho se incrementen los tenores salinos por ascenso capilar de sales, consiguieron disminuir la salinidad del suelo desde de $11.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ hasta $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Palabras clave adicionales: Arroz, Cuba, salinidad, drenaje sub-superficial.

ABSTRACT

In the North area of Granma, a Cuban province, the salinity of the soils is an obstacle for the attainment of high yields in the rice. This area is characterized by the scarce precipitation, the shallow phreatic levels (1.5-2.5 m) and strongly mineralized ($4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), that makes indispensable the drainage for the control of the soil salinity. In order to obtain references to introduce the subsurface drainage in these areas, it was carry out during three years, in a pilot lot of 6.5 ha, an experiment with drains spaced at 30 and 100 m in trenches of 1.3 m-depth with filler of shell of rice in the bottom. During the rain season the drains spaced at 30 and 100 m evacuated the 11.2 and 6.0 % of the precipitation, respectively; however, when the phreatic level stayed below the drain, the discharge was almost constant and take values of $0.05 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ in the drain of 30 m and of 0.014 in that of 100 m. With the irrigation, the discharges of the drains were similar in both distances and they reached values averages of $1.63 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$. Under conditions of non-permanent regime, that coincides with the period of no irrigation, the validity of the equation of Glover-Dumm was demonstrated, and the medium value of K obtained from this evaluation ranged between $0.2\text{-}0.5 \text{ m}\cdot\text{day}^{-1}$. Both spacing were efficiently allow the wash out of the soil salts and to impede that in the fallow time the saline tenors in the soils increased. As the same time, they diminishes the soil salinity from of $11.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ up to $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Additional key words: Cuba, rice, soil salinity, subsurface drainage.

INTRODUCCIÓN

El arroz está considerado entre los cultivos sensibles a la salinidad y se ha señalado que a partir de una conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada del suelo (Cep) de $3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ el rendimiento potencial declina rápidamente en un entorno de un 12 % por cada incremento de unidad de la Cep del suelo (FAO, 1985).

Para impedir la salinización y para revertir el mal una vez presente, es incuestionable la necesidad del drenaje, cuya función es, en primer término, permitir la evacuación de las sales a través del agua que lava el perfil del suelo y, en segundo término, el control del nivel freático a un nivel tal que se impida el ascenso de las sales por capilaridad.

En este sentido, los resultados obtenidos por Pujol *et al.* (1991) en suelos salinizados cultivados con arroz en la provincia de Granma, Cuba, demostraron la factibilidad del drenaje en la recuperación de estos suelos. En este estudio se utilizaron canales abiertos, los cuales, si bien cumplieron su papel como drenaje sub-superficial en el lavado del suelo y en el abatimiento del nivel freático, demostraron también las inconveniencias de esta solución.

Entre las principales dificultades que tienen los canales abiertos está la erosión que los mismos sufren, el enyerbamiento, la pérdida de área productiva y la obstrucción del movimiento agrícola en las terrazas. Estas razones, al parecer, han conducido a la introducción en las áreas arroceras del drenaje soterrado, tal y como ha ocurrido en los últimos años en países de larga tradición en éste (Alva y van Alphen, 1976; Guindy y Risseueuw, 1987; Dayem y Eid, 1989; Wei y Song, 1989; Canaparro *et al.*, 1991). Por su parte, Van der Molen *et al.* (2007), señalaron que, en el caso del arroz, el drenaje controlado permite la elevación del manto hasta la superficie, con vistas a prevenir las pérdidas de agua, lo cual en este momento no causa peligro de salinización debido a la ausencia de flujo capilar ascendente en el suelo inundado. Más adelante, en ausencia de inundación el drenaje permite mantener el nivel del manto a un nivel tal que impida el ascenso capilar de las sales.

A través de la evaluación del comportamiento de los sistemas de drenaje sub-superficial se buscan dos objetivos básicos: (1) identificar los aspectos técnicos más relevantes, impacto ambiental y retorno económico de estos sistemas de drenaje, y (2) desarrollar lineamientos para la evaluación del comportamiento, subrayando los mayores indicadores en este sentido (Martínez-Beltrán *et al.*, 2007).

En concordancia con lo anterior, se diseñó y construyó un lote de drenaje soterrado en la zona norte de la empresa arrocería "Fernando Echenique", en la Provincia de Granma, Cuba, con vistas a obtener los parámetros y los criterios para el diseño de los sistemas de drenaje sub-superficial en los suelos arroceros afectados por la salinidad, cuyos primeros resultados de evaluación hidráulica se exponen en este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Provincia de Granma, Cuba, en un área dedicada a la producción de arroz ubicada en la cuenca del valle del río Cauto. La Figura 1 muestra la localización del área experimental, así como un esquema del sistema de drenaje.

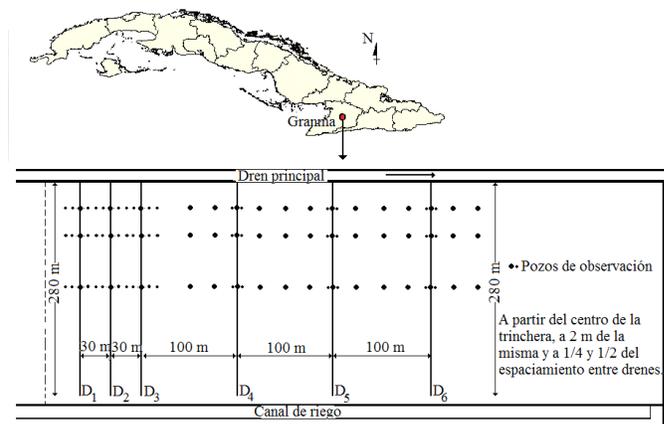


Figura 1. Ubicación de la parcela de drenaje y esquema del diseño y localización de los pozos de observación.

La caracterización detallada del área, así como los elementos teóricos del diseño del drenaje tomados en cuenta para este caso en específico, fueron discutidos con anterioridad (Pujol *et al.*, 1991). El suelo es del tipo Aluvial, el cual se correlaciona con el tipo Fluvisol de la clasificación FAO-UNESCO (FAO, 1988).

En el horizonte por debajo de 1.5 m se encuentra el manto casi permanente, que coincide con el horizonte, donde el tipo de arcilla predominante en el mismo es la esmectita; la conductividad hidráulica en 12 ensayos realizados en el área mediante el método del pozo barrenado en presencia de manto freático (Van Beers, 1983), varió entre 0.04 y $0.5 \text{ m} \cdot \text{día}^{-1}$ para niveles del agua en el pozo entre 1 y 1.74 m.

Se utilizaron espaciamientos entre drenes de 30 y 100 m. La profundidad promedio de instalación de la tubería de drenaje fue de 1.30 m y se realizó con la máquina atrincheradora de fabricación soviética ET 202, siguiendo los procedimientos para el trabajo con la misma descritos por Felipe *et al.* (1989). En los drenes espaciados a 30 m se utilizó tubería de polietileno de baja densidad de 100 mm de diámetro interior, ranurada a mano, en tanto que para el espaciamiento de 100 m la tubería utilizada fue de barro de similar diámetro. El ancho de la trinchera abierta por la máquina fue de 0.5 m y la misma estaba dotada de una guía eléctrica para asegurar la uniformidad de la pendiente del fondo de la trinchera. Las tuberías fueron colocadas a mano en el fondo de la trinchera, y posteriormente rellena con cáscara de arroz hasta una altura de 0.2 m por encima del dren y cubierta finalmente con tierra.

Se construyeron dos parcelas, las cuales constaron con tres líneas de tubos de 280 m de longitud. Para las evaluaciones del comportamiento hidráulico del sistema se seleccionó la

línea central en cada una de ellas. Al momento de la instalación de la tubería fue colocada una hilera de pozos de observación perpendiculares al punto medio de la longitud de la tubería de drenaje y a partir del centro de la trinchera, a 2 m de la misma y a $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del espaciamiento entre drenes.

Las mediciones del gasto de las tuberías se realizaron con un recipiente graduado y cronómetro (aforo volumétrico), repetidos tres veces en cada medición. Los niveles de agua en los pozos de observación se midieron el mismo día con cinta graduada acompañada de una pesa en el extremo. Durante los tres primeros meses de medidas, las mismas se realizaron cada tres días y, después, cuando el área comenzó a sembrarse, las mismas se espaciaron a siete días y se incluyó, además, la altura del agua en la terraza arrocera.

A partir de los datos de la carga sobre el dren y la descarga (Martínez-Beltrán, 2001), se calculó la función:

$$\frac{q_t}{h_t} = f(h) \quad (1)$$

Donde q_t es la descarga específica en el tiempo t ($\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$), h_t es la carga hidráulica en el punto medio entre dos drenes en el tiempo t (m). La pendiente de esta función permite calcular la conductividad hidráulica a partir de la Ecuación (2), la cual se conoce como ecuación de Glover Dumm:

$$K = \frac{tg\gamma L^2}{3.46} \quad (2)$$

Donde K es conductividad hidráulica ($\text{m} \cdot \text{día}^{-1}$), $tg\gamma$ es la pendiente de la función $\frac{q_t}{h_t} = f(h)$ y L es el espaciamiento entre drenes (m).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con Martínez-Beltrán *et al.* (2007), la evaluación del comportamiento de los sistemas de drenaje sub-superficial permite identificar los aspectos técnicos más relevantes, los impactos ambientales y el beneficio económico del sistema de drenaje. En este trabajo se discuten los aspectos relacionados con el comportamiento hidráulico del sistema, mientras que Herrera *et al.* (2009), explicaron los aspectos concernientes al impacto ambiental del mismo, en particular el efecto en la calidad del agua drenada.

Al relacionar la lluvia total caída con el agua evacuada por los drenes para un período de evaluación de 791 días para cualquiera de los dos espaciamientos de drenaje, se encontró la existencia de cinco periodos de lluvia/drenaje bien definidos (Figura 2). En los periodos P_1 , P_2 y P_3 la curva tomó una dirección casi vertical debido al incremento del gasto acumulado sin el incremento de la lluvia, lo cual está relacionado a su vez con la ocurrencia de periodos de riego debido al cultivo del arroz. Esto provocó un incremento de la razón lluvia acumulada al gasto acumulado (coeficiente de restitución; CEMAGREF, 1984) con relación a

los valores obtenidos en la época en que el gasto depende sólo de la lluvia, el cual fue, para el promedio de los dos periodos de medición, de 6.2 y 11.2 mm para los espaciamientos de 30 y 100 m respectivamente, y diferentes en 27 unidades con relación a los periodos de riego en ambos espaciamientos.

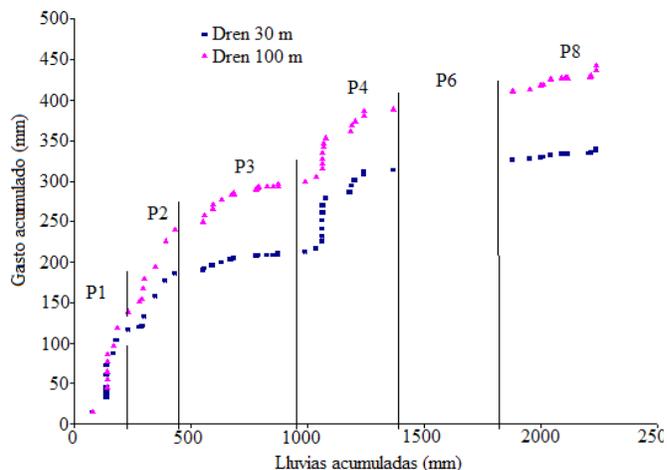


Figura 2. Relación entre la curva de lluvia acumulada y el gasto acumulado en los dos espaciamientos de drenaje (coeficiente de restitución durante el período evaluado).

De acuerdo con los resultados de las curvas de doble masa (Figura 2) se seleccionaron tres periodos para la evaluación del funcionamiento hidrológico del sistema. A éstos se añadió un cuarto periodo formado por mediciones tomadas en el año 1992. Los hidrógrafos de la descarga (q en $\text{m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$) y la carga hidráulica en el centro entre dos drenes (h en m) fueron preparados para cada uno de los periodos estudiados y para cada espaciamiento. En la Figura 3 se presenta un ejemplo para uno de los periodos evaluados.

La Figura 3a muestra los resultados del período de evaluación inicial para el espaciamiento de 30 m. Al comienzo de la misma, la carga sobre el dren tenía un valor de 0.38 m, influenciado por los 182.7 mm de lluvia ocurridos en los treinta días anteriores; a partir de este momento el nivel freático y el gasto descendieron casi linealmente hasta alcanzar gastos menores a $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ para niveles de agua sobre el dren de 0.03 m. Esta misma tendencia se muestra en la Figura 3b para igual período en el espaciamiento de 100 m.

Al parecer, la lluvia caída en este período de evaluación, que fue de 132 mm (como promedio $4.1 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$), no fue suficiente para recargar notablemente el manto frente a las descargas del drenaje y la evapotranspiración de la zona, que en esta época puede alcanzar hasta los $6 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$.

Las Figuras 3c y 3d representan uno de los tres periodos en que el área fue sembrada con arroz. En general el comportamiento de los hidrógrafos para este caso es similar en todos los periodos y espaciamientos y se caracteriza por una zona de la curva aplanada donde coinciden los máximos valores de la descarga y la carga y que se corresponden con el tiempo en que el campo arrocero se mantiene inundado. En esta zona de la curva la carga sobre el dren y el gasto son constantes (puede equipararse

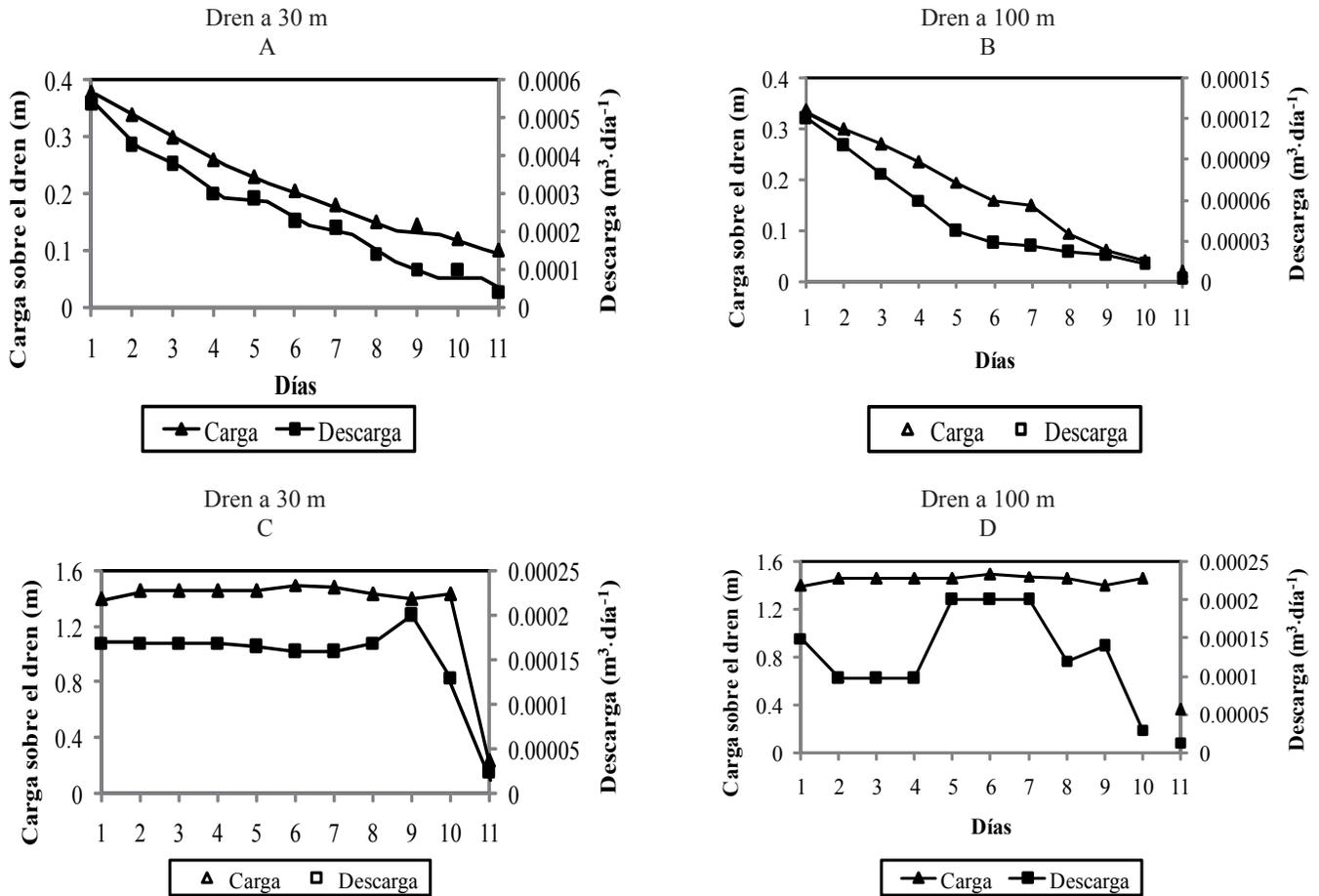


Figura 3. Hidrógrafos de carga y descarga en dos periodos seleccionados.

con el flujo en condiciones de régimen permanente) y alcanzan valores de alrededor de 1.4 m (10 cm de altura del agua sobre el nivel del suelo) de carga y los gastos entre 1.98 y 1,92 m³·día⁻¹ (valor de la mediana), para los espaciamientos de 30 y 100 m respectivamente. La componente del flujo por debajo del nivel del dren en este caso es casi nula.

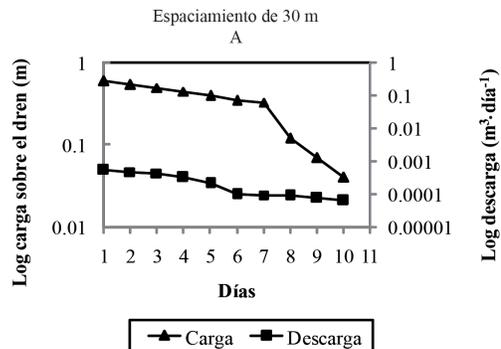
Cuadro 1. Profundidad del nivel freático, carga hidráulica y descarga para los periodos y espaciamientos estudiados.

Periodo	Nivel freático (m)		Régimen permanente		Régimen variable			
	Inicial	Final	h (m)	q (mm·día ⁻¹)	ho (m)	ht (m)	q1 (mm·día ⁻¹)	q2 (mm·día ⁻¹)
Espaciamiento de 30 m								
21/10/92	0.92	1.20	-	-	0.38	0.1	0.5	0.05
25/11/92	-	-	1.4	1.6	1.4	0.2	1.6	0.2
10/06/97	-	-	1.4	2.0	1.4	1.02	2.3	1.6
04/07/97	-	-	1.4	1.04	1.4	0.51	1.04	0.7

Una segunda zona de la curva, que comienza desde el momento de la suspensión del riego al cultivo, muestra características similares a las de las Figuras 3a y 3b y semeja condiciones de flujo en régimen variable. En este período, las

cargas varían desde 1.4 al inicio (suspensión del riego) hasta 0.2 m sobre el nivel del dren al final del período. El Cuadro 1 muestra un resumen del comportamiento de la carga y el gasto en los diferentes periodos y espaciamientos estudiados.

En las Figuras 4a y 4b se compara, mediante ejes logarítmicos, los datos representados en la Figura 3 para la zona de la curva correspondiente al régimen no permanente. Las líneas obtenidas son en general paralelas, teniendo en cuenta los largos periodos entre mediciones y la calidad del material empleado en las mismas. Esto indica que existe un flujo prioritario del agua por debajo del dren en las condiciones en que la terraza no está inundada. Durante el período de inundación, y debido a la infiltración del agua que inunda las terrazas (característico del riego en el arroz), al parecer existe una recarga del manto, el cual descarga luego el aceno capilar a través del drenaje.



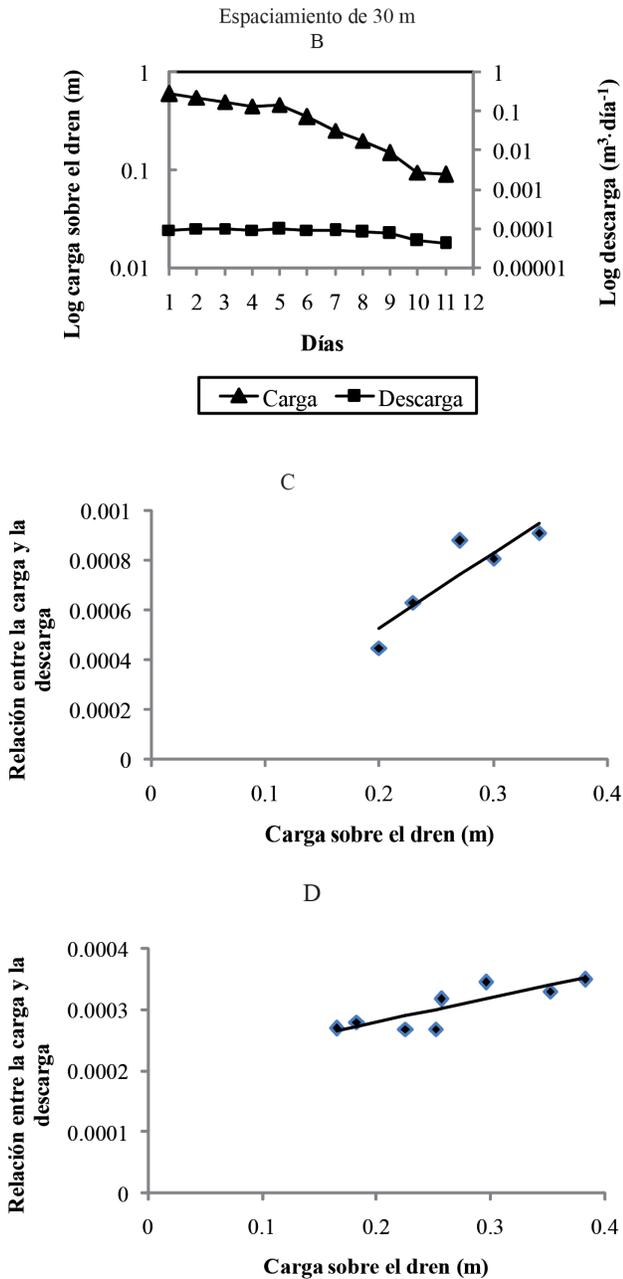


Figura 4. Relación entre la carga hidráulica y la descarga.

Cuadro 2. Cálculo de la conductividad hidráulica.

Período	Distancia entre drenes (m)	Descenso del manto (m)	r h/q-h	Tan γ	Conductividad hidráulica (K, m·día ⁻¹)
21/10/92-	30	0.9-1.21	0.68	3x10 ⁻³	0.67
25/11/92	100	0.93-1.11	0.82	4x10 ⁻⁴	1
20/06/97-	30	0.06-1.00	0.92	6x10 ⁻⁴	0.14
04/07/97	100	0.05-1.15	0.98	2x10 ⁻⁴	0.5
18/06/97-	30	0.1-1.00	0.99	9x10 ⁻⁴	0.2
24/07/97	100	0.0-1.15	0.99	2x10 ⁻⁴	0.5

La relación entre q/h y h se muestra en las Figuras 4c y 4d y, a partir de las mismas, se elaboró el Cuadro 2, donde se resumen los cálculos de la conductividad hidráulica, a partir de la Ecuación (2). El valor mediano de las seis observaciones de K fue de 0.2 m·día⁻¹ para el espaciamiento entre drenes de 30 y de 0.5 m·día⁻¹ para el espaciamiento de 100 m. Estos valores, en general, están dentro del rango utilizado para el cálculo inicial del espaciamiento y también concuerdan con los reportados por Pujol *et al.* (1991) para esta misma área, pero calculados a partir de experimentos con drenaje por zanjas abiertas.

CONCLUSIONES

En condiciones de régimen no permanente, se demostró la validez de la ecuación de Glover-Dumm, con un valor mediano de conductividad hidráulica que osciló entre 0.2 y 0.5 m·día⁻¹. Los espaciamientos de 30 y 100 m permitieron un lavado del suelo e impidieron que en la época de barbecho se incrementarán los tenores salinos por ascenso capilar de sales, disminuyéndose en la parcela la salinidad del suelo desde de 11.5 dS·m⁻¹ hasta 3 dS·m⁻¹. Durante el tiempo en que las parcelas arroceras se mantuvieron inundadas se demostró, para los espaciamientos de 30 y 100 m, que tanto la carga sobre el dren como el gasto son constantes y, por tanto, el régimen se puede considerar permanente, para fines de diseño de sistemas de drenaje.

LITERATURA CITADA

Alva C. A.; Van Alphen J. G. 1976. Problemas de Drenaje en la Costa Peruana. Boletín ILRI. The Netherlands. 116 p.

Canaparro F. L.; Beltrame F. S. I.; Losada J. A. S. 1991. Drenagem subterrânea. Alternativa para aumentar a rentabilidade das varzeas. Lavoura Arroceira 44(3-5): 354-358.

CEMAGREF. 1984. L'Experimentation en Drainage Agricole. Études du CEMAGREF, No. 511. CEMAGREF, France. 95 p.

Dayem S. A.; Eid N. M. 1989. An assessment of irrigation requirement for rice in fields with covered drains. ICID, Seventh Afro-Asian Regional Conference, Tokio. pp: 13-23.

FAO. 1985. Water Quality for Agriculture Rev 1. FAO Irrigation and Drainage. Papers No 29. FAO, Rome. 174 p.

FAO. 1988. FAO/UNESCO Soil Map of the World: Revised Legend. FAO; International Soil Reference and Information Centre (Netherlands). Rome, Italy. 119 p.

Felippe M.; Rodríguez A.; Sudarikov I. 1989. Guía Metodológica para la Construcción de Drenaje Soterrado con la Máquina Atrincheradora ETC-202-B. Centro de Información y Documentación Agropecuario. Ciudad de la Habana, Cuba. 30 p.

Guindy E.; Risseuw S. 1987. Research on Water Management of Rice Field in the Nile Delta, Egypt. ILRI, Publication 41. Wageningen, Netherlands. 72 p.

Herrera P. J.; Pujol R.; Alarcón O. R.; Espinosa E. 2009. Calidad de las aguas de drenaje procedentes de campos arroceros sobre suelos salinos en la Cuenca del Cauto. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 18(3): 14-18.

Martínez-Beltrán J. 2001. Evaluación de sistemas de drenaje agrícola. In: III Curso Internacional de Ingeniería de Drenaje Agrícola, Volumen III. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, Chapingo, México. pp: 43-66.

- Martínez-Beltrán J.; González-Casillas A.; Namuche-Vargas R. 2007. A Component of the FAO Normative Program on Land Drainage: Mexico case study on the evaluation of the performance of subsurface drainage systems. *Irrigation and Drainage* 56: S179-S190.
- Pujol R.; Van Hoorn J.W.; Herrera J.; Posada M.; Pavón A.; Castellanos A. 1991. Evaluación del comportamiento hidrológico de un sistema de drenaje en áreas arroceras del Valle del Cauto. *In: Memorias del Coloquio Cubano-Francés sobre el Mejoramiento y Manejo de Vertisuelos*, Bayamo, Granma, Cuba. pp: 295-302.
- Van Beers W. F. J. 1983. The Auger-Hole Method; a Field Measurement of the Hydraulic Conductivity of Soil Below the Water Table. Sixth edition. ILRI Bulletin 1. Wageningen, The Netherlands, ILRI. 32 p.
- Van Der Molen W. H.; Martínez J.; OCHS W. J. 2007. Guidelines and Computer Programs for the Planning and Designs of Land Drainage Systems. FAO Irrigation and Drainage Paper 62. Food and Agriculture Organization (FAO). United Nations, Rome, Italy. 228 p.
- Wei Z.; Song S. T. 1989. Influence of drainage practice on rice yields. ICID Seventh Afro-Asian Regional Conference. Tokio. pp: 65-84.