

# Diseño de un sistema de riego hidrante parcelario con los métodos por Turnos y Clement: análisis técnico y económico

## Design of a system of farm hydrant with the Turns and Clement methods: technical and economic analysis

Bartolomé Espinosa Espinosa<sup>1‡</sup>, Héctor Flores Magdaleno<sup>1</sup>,  
Roberto Ascencio Hernández<sup>1</sup> y Guillermo Carrillo Flores<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.  
Autor responsable (bespinosa@live.com.mx)

---

### RESUMEN

El uso óptimo y sostenible de los recursos hídricos disponibles para riego, requiere que las instalaciones usadas para irrigar permitan administrar el agua con las estrategias de manejo adecuadas a cada situación. Este aspecto, es imprescindible para rentabilizar las inversiones en infraestructura para los cultivos en la zona regable y por la evolución de las políticas y mercados agrícolas. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo realizar un análisis técnico y económico de un sistema de riego a hidrante parcelario empleando los métodos por Turnos y Clement, en el módulo Yurécuaro del Distrito de Riego 087, localizado en el estado de Michoacán, México, con la finalidad de recomendar a los usuarios un diseño para los sistemas de riego. El análisis de los resultados mostró que el diseño hidráulico por el método de Turnos requiere diámetros menores de tubería para su funcionamiento, mientras que para el diseño empleando el método de Clement demandó diámetros mayores que le permitieron mayor flexibilidad en el sistema de riego. El costo de inversión inicial del sistema de riego diseñado con el método de Clement fue 28% mayor en comparación con el método de diseño por Turnos. Los costos de operación del sistema de riego por el método de Turnos, fue 12.5% mayores en comparación con el método de Clement.

**Palabras clave:** *costos de riego; irrigación; recursos hídricos.*

### SUMMARY

The optimal and sustainable use of water resources available for irrigation requires that the irrigation facilities are able to manage water with appropriate strategies for each situation. This aspect, is absolutely necessary to make profitable investments in infrastructure for crops in irrigated areas and because of the evolution of policies and agricultural markets. For this reason, the objective of this study was to perform a technical and economic analysis of a plot hydrant irrigation system design using the Turns and the Clement methods in the module Yurecuaro of Irrigation District 087, located in the state of Michoacán, Mexico, in order to recommend a better design solution for irrigation systems. Analysis of the results shows that the hydraulic design by the Turns method requires smaller pipe diameters to operate, while the design using the Clement method requires larger diameters that allow greater flexibility in the irrigation system. The initial investment cost of the irrigation system designed with the Clement method was 28% higher than that with the Turns method. Operating costs of irrigation using the Turns method were 12.5% higher than the costs using the Clement method.

**Index words:** *irrigation costs; irrigation; water resources.*

---

#### Como citar el artículo:

Espinosa Espinosa, B., H. Flores Magdaleno, R. Ascencio Hernández y G. Carrillo Flores. 2016. Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por Turnos y la técnica de Clement. *Terra Latinoamericana* 34: 431-440.

---

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: julio de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 431-440.

## INTRODUCCIÓN

En dos terceras partes de México el clima es árido y semiárido con precipitaciones medias inferiores a 500 mm, mientras que en la tercera parte restante son mayores a 1600 mm anuales. Esta distribución irregular de la lluvia ha obligado a construir obras de riego aprovechando los recursos hidráulicos locales para optimizar el desarrollo de los cultivos (CONAGUA, 2008). En México se cultivan 20 millones de hectáreas de las cuales 6.4 millones son de riego, lo que coloca al país entre los primeros del mundo en superficie irrigada. El sector agrícola consume 77% del volumen de agua utilizada (61.2 km<sup>3</sup>), con una eficiencia global de 45%, y los sistemas de producción bajo riego generan 55% de la producción agrícola nacional y 70% de los productos agrícolas de exportación (Tun-Dzul *et al.*, 2011). La principal limitante para optimizar la producción agrícola en México es la poca disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas del país, la explosión demográfica y la demanda de los sectores económicos en dichas zonas; con el crecimiento poblacional la demanda de agua para consumo humano e industrial se eleva, reduciendo su disponibilidad para las áreas agropecuarias. Por tal motivo, es necesario el uso eficiente del agua en el sector agropecuario, mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos para conducir, distribuir y aplicar el agua de riego; así como en el diseño, revisión y evaluación de los sistemas de riego. El uso óptimo y sostenible del recurso hídrico disponible para riego requiere que la infraestructura permita gestionar el agua de riego con las estrategias de manejo más adecuadas en cada situación, y solo condicionada por los cultivos que se adopten en la zona, así como por la evolución de las políticas y mercados agrícolas (Planells *et al.*, 1999).

Además, la baja disponibilidad de agua en las presas del país ha repercutido en la sobreexplotación de los acuíferos, lo cual origina la necesidad de establecer estrategias para un mayor control en la administración del recurso hídrico. Entre estas estrategias, destaca la tecnificación del riego que implica la incorporación de técnicas y métodos racionales cuantitativos que permitan ejercer un mayor control de esta importante práctica agrícola, que a nivel de parcela sugiere su diseño y programación eficiente del riego (Catalán y Villa, 2009).

Un sistema de riego tiene como objetivo central, satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, en el momento adecuado y con la cantidad necesaria de manera eficiente y uniforme, es decir, que la mayor cantidad de agua quede almacenada en la zona radical a disposición del cultivo (Ángeles, 2000), tomando en cuenta el requerimiento de riego, representado por la necesidad de agua del cultivo, a fin de garantizar condiciones óptimas de desarrollo (FAO, 2006). La tecnificación del riego no necesariamente implica que se alcancen altas eficiencias, si estos sistemas no se operan adecuadamente bajo las premisas de su diseño (Tun-Dzul *et al.*, 2011). En un sistema de riego con éxito, un conjunto de recursos produce el máximo rendimiento, para lograrlo, es necesario un proceso de optimización que apoye el diseño y operación de los sistemas de aplicación de agua en la agricultura, mediante la combinación de variables que satisfagan las condiciones de riego por lo cual es necesario la selección apropiada de los métodos y estrategias relacionadas con la disponibilidad de agua, las características del clima, suelo y cultivo; asimismo, de las condiciones sociales y económicas y de las restricciones de distribución del sistema. (Holzapfel *et al.*, 2007).

La inversión en los sistemas de riego implica un capital de alto costo; sin embargo, los costos de funcionamiento y operación son insignificantes en comparación con aquellos costos que son derivados de la reparación de maquinaria, combustible, gastos de agua y mano de obra si no se tiene un sistema de riego bien diseñado (Herwin, 1981).

Para aumentar la sustentabilidad de la agricultura, un aspecto importante que ha sido considerado por numerosos investigadores es el eficiente diseño de los sistemas de riego. Rodríguez *et al.* (2006) mencionan que el diseño óptimo de una red de distribución tiene varios aspectos relevantes de tipo hidráulico, rentabilidad, disponibilidad de tuberías, calidad del agua y distribución de la demanda. El diseño y manejo de los sistemas de riego afecta en forma sustantiva la eficiencia de aplicación e involucra numerosas variables y restricciones, cuyo principal objetivo es maximizar los beneficios y minimizar costos. En un sistema de riego exitoso, los recursos utilizados deben producir el máximo retorno, para obtener lo expresado anteriormente, el diseño y manejo de los métodos de aplicación de agua requieren el soporte de un

proceso de optimización debido a la gran cantidad de combinaciones posibles de variables que satisfacen las condiciones de riego establecidas (Lorite *et al.*, 2009).

Dos tendencias a seguir en el diseño hidráulico de los sistemas de riego son: realizar el dimensionamiento más económico en cuanto al tamaño del diámetro de la red. Si bien este tipo de método resulta ser de los más económicos, también implica un consumo de energía mayor al generar mayores pérdidas por fricción por su menor capacidad de conducción en la red; además de restringir la flexibilidad de operación, obligando a los usuarios a una estricta organización en la operación de la red para el suministro de agua; como segunda tendencia está tener máxima flexibilidad en el manejo de la red, esto es, que el sistema de riego tenga la capacidad de entregar el agua a los usuarios en tiempos relativamente cortos. Lograr una mayor flexibilidad implica un sobredimensionamiento de la red y por lo tanto un mayor costo inicial. En contraparte, tienen la ventaja de abatir los costos de operación por consumo de energía al tener una mayor capacidad de conducción en la red hidráulica.

La organización de la demanda por redes de distribución a presión ha tenido una amplia aceptación debido a que proporciona autonomía al agricultor para decidir el momento y la lámina de riego. No obstante, este tipo de organización presenta el inconveniente de que el costo de la red es mayor, ya que es necesario redimensionarla para caudales mayores. La organización por turnos es una alternativa factible gracias a la gestión automática aplicada a las redes de distribución a presión que permite superar el inconveniente de la coordinación. La automatización de la gestión permite programar que determinados hidrantes puedan abrir y regar durante un lapso de tiempo limitado (Monserrat *et al.*, 2012). El método de Clement provoca una subestimación de caudales en la cabecera de red de 35 a 40%, una de las causas más importantes es que no se cumple la hipótesis de igual probabilidad de apertura de tomas en los diferentes días de la semana y durante todas las horas de la jornada efectiva de riego (Tarjuelo *et al.*, 2006), haciendo que el riego, pueda o no ser continuo, dependiendo de las necesidades del usuario, quien es el que determina cuando regar.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue realizar un análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario empleando dos métodos de diseño, el método por Turnos y

el método de Clement, con la finalidad de recomendar a los usuarios una mejor solución de diseño para los sistemas de riego.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el módulo de riego Yurécuaro, del Distrito de Riego 087, localizado en la cuenca Lerma-Chapala. Tiene una superficie de riego de 4234.61 ha, 770 usuarios y una dotación promedio de 5.5 ha por usuario. Este módulo está entre 19° 45' y 20° 30' N y 101° 25' y 102° 30' de O, a una altura media de 1690 m. Al norte limita con el Río Lerma; al sur con la Carretera Yurécuaro-Tanhuato; al oriente con el Canal Principal Margen Derecha y al poniente con la Presa Gonzalo.

El clima, según la clasificación de Köppen y modificado por Enriqueta García (1973), es subhúmedo con lluvias en verano y vegetación de estepa, con precipitación media que varía entre los 750 mm a los 820 mm anuales en las distintas áreas de la cuenca y temperatura media anual de 18.8 °C.

### Diseño Agronómico

Para el desarrollo del presente trabajo, se realizó un levantamiento topográfico con equipo GPS diferencial para la generación de polígonos de parcelas y estructuras de la zona de riego, y una estación total para la generación de curvas de nivel.

El requerimiento de riego y el Coeficiente Unitario de Riego (CUR) se obtuvieron utilizando el programa estadístico Cropwat 8.0 (FAO, 2010), con base en el patrón de cultivos, fechas de siembra e información climatológica de la zona de estudio; la información climatológica se tomó de la estación meteorológica No. 16141 "Yurécuaro", utilizando valores promedio anuales de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III, versión 2.0 (IMTA, 2009). Los valores de humedad, velocidad del viento y radiación solar se estimaron con base en los datos de temperatura, altitud y latitud de la zona, de acuerdo con el programa estadístico Cropwat 8.0. Con los datos de temperatura máxima y mínima, se estimó la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) utilizando el método de Penman-Monteith (FAO, 2006). Posteriormente, con los datos de precipitación, el programa estadístico calculó la precipitación efectiva

con el método de Precipitación confiable mediante la ecuación FAO/AGLW (FAO, 2010). Asimismo, fue necesario agregar los cultivos existentes, fechas de siembra y sus respectivos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) en la zona de riego (FAO, 2006), para generar el patrón de cultivos correspondiente. Finalmente se obtuvieron las láminas de riego en  $\text{mm d}^{-1}$  y el CUR en  $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$  para cada mes. Con los datos de CUR, para el mes de máxima demanda, y considerando las eficiencias de conducción, distribución, y aplicación, multiplicado por la superficie de la zona de estudio, se obtuvo la capacidad del sistema de riego.

### Diseño Hidráulico

Con la información obtenida del diseño agronómico, se definió para ambos métodos un gasto máximo de operación ( $\text{L s}^{-1}$ ) considerando un tiempo de riego de 22 h por día. La lámina calculada se basó en los requerimientos de riego, lo que implica que el gasto máximo sea el necesario para satisfacer las necesidades hídricas de ese día. Utilizando el gasto máximo, se calculó el número de hidrantes empleando la expresión (1):

$$\text{No. de hidrantes funcionando} = \frac{Q_{\text{máx}}}{Q_{\text{hidrante}}} \quad (1)$$

dónde:  $Q_{\text{máx}}$  es el gasto de diseño obtenido con el diseño agronómico ( $\text{L s}^{-1}$ );  $Q_{\text{hidrante}}$  es el gasto específico del hidrante a utilizar ( $\text{L s}^{-1}$ ).

Para calcular el número de turnos se utilizó la expresión (2):

$$\text{No. de turnos} = \frac{\text{No. total de hidrantes}}{\text{No. de hidrantes funcionando}} \quad (2)$$

Para realizar el diseño hidráulico del sistema de riego por el método de Turnos, se definieron dos tiempos: la duración y la frecuencia del turno. El primero correspondió al tiempo que transcurrió mientras cada sección de riego recibía agua en su turno, y el segundo al tiempo en que cada sección de riego comenzó a recibir agua en un turno y el momento en que comenzará a recibir agua en el turno siguiente (Peña, 2007). Este método implica tener una estricta organización con los usuarios.

Para la operación del sistema de riego diseñado por el método de Turnos, se estableció un horario específico

para que cada uno de los hidrantes se encontrara abierto en un tiempo determinado y el arreglo de los turnos estuvo dado en función de la posición de los hidrantes, con la finalidad de que no regaran al mismo tiempo parcelas que utilicen un mismo ramal; logrando dividir el gasto máximo de diseño, haciéndolo circular por diferentes ramales y minimizando los diámetros de tubería utilizados.

El sistema de riego diseñado con el método de Clement se realizó suponiendo una distribución aleatoria de caudales, de manera que, si una red tiene  $N$  tomas con una dotación  $d$ , las cuales pueden estar abiertas o cerradas en un momento dado, es improbable que todas estén abiertas a la vez y por tanto que el caudal en cabecera ( $Q_0$ ) sea  $Q_0 = N d$ . Se calculó el caudal que podía circular por cada línea para una determinada garantía de suministro, buscando reducir el diámetro necesario respecto al requerido con todas las tomas abiertas (Planells *et al.*, 1999).

El gasto que fluyó en cada tramo de la red correspondió al periodo de máxima demanda durante la época de riego, el cual se obtuvo con el diseño agronómico. El método de Clement, pretende lograr una máxima garantía de suministro de acuerdo con el gasto disponible que abastece la red; para lograr la máxima garantía de suministro y dimensionar la red de tuberías, se utilizó la expresión (1), con la que se determinó el número máximo de hidrantes que estuvieron operando en un ramal, los cuales no superaron el gasto máximo de diseño.

Los cálculos para el diseño hidráulico del sistema de riego para los dos métodos se realizaron utilizando el programa WCADI 2008 (WCADI, 2008). Con las curvas de nivel, se generó una malla para obtener las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de cada punto en toda la superficie de la zona de estudio, y considerar la topografía de la zona en el análisis. Se digitalizaron los nodos y se crearon los trazos de los tramos de tubería. En el caso del método por Turnos, una vez obtenido el número de turnos para el sistema de riego, se procedió a indicar los hidrantes que estarían operando en cada uno de los ramales para proceder al diseño de la red. Para el método de Clement, se procedió a indicar los rangos de certeza de acuerdo con la garantía de suministro, en este caso fue un máximo de 100% y un mínimo de 88%, además de introducir los parámetros de diseño y proceder al cálculo de la red con dicho método. Se ingresaron datos del límite de velocidad permisible, parámetros para el cálculo de las pérdidas de carga, realizando un

análisis hidráulico por presión inicial, con el propósito de calcular la carga necesaria para el funcionamiento de todo el sistema y obtener el dimensionamiento de las líneas de conducción para cada uno de los métodos.

**Costos de Inversión**

Tanto para el método de Turnos como el de Clement, se consideraron los siguientes costos de inversión: adquisición de la tubería, accesorios y conexiones para la tubería, instalación de la tubería, movimiento de tierras, tren de descarga, obra civil del cárcamo de bombeo, equipo de bombeo y obra eléctrica. Los beneficios directos de la rehabilitación y modernización de la infraestructura hidroagrícola son el rescate de volúmenes de agua y la mejor oportunidad del riego. Para evaluar económicamente estos beneficios, se consideró el impacto del volumen ahorrado y la oportunidad de riego en el incremento de la utilidad neta agrícola, ya que al utilizar más eficientemente el recurso agua se pueden alcanzar mayores rendimientos.

**Evaluación Económica**

La evaluación económica se realizó contrastando los métodos de diseño por Turnos y Clement, se calcularon los indicadores de rentabilidad más importantes: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio Costo (B/C).

El Valor Presente Neto (VPN) se obtuvo mediante la expresión (3):

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \tag{3}$$

dónde: VPN es el valor presente neto (\$);  $B_t$  son los beneficios totales en el año t (\$);  $C_t$  son los costos totales en el año t (\$);  $B_t - C_t$  es el flujo neto en el año t (\$); n es el número de años del horizonte de evaluación; r es la tasa social de descuento; y t es el año calendario, en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones.

Para el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) se utilizó la expresión (4), donde VPN es igual a 0:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+TIR)^t} = 0 \tag{4}$$

dónde:  $B_t$  son los beneficios totales en el año t (\$);  $C_t$  son los costos totales en el año t (\$);  $B_t - C_t$  es el flujo neto en el año t (\$); n es el número de años del horizonte de evaluación; TIR es la tasa interna de retorno (%); y t es el año calendario, en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones.

Para el cálculo de la Relación Beneficio Costo (B/C), se utilizó la expresión (5):

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{Vi}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{Ci}{(1+i)^n}} \tag{5}$$

dónde: B/C es la relación Beneficio/Costo (Adimensional); Vi es el valor de la producción (\$); Ci son los egresos ( $i = 0, 2, 3, 4, \dots, n$ ) (\$); i es la tasa de descuento.

Se elaboró para ambos métodos, un análisis de sensibilidad del porcentaje de incremento en el monto de inversión y del porcentaje de reducción en los beneficios (SHCP, 2012), realizando cambios en una variable a la vez y observando los efectos en el VPN y en la TIR.

Se calculó el costo anual equivalente en dos pasos con base en el valor del dinero en el tiempo. Primero se calculó el valor presente de todos los costos asociados a la posesión del activo durante toda su vida con la expresión (6). Estos costos incluyen el precio de compra, costos de mantenimiento y de operación durante 30 años, tiempo de vida esperado en los proyectos de infraestructura hidroagrícola.

$$VPC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{6}$$

dónde: VPC es el valor presente del costo total del proyecto (\$);  $C_t$  son los costos totales en el año t (\$); r es la tasa social de descuento; t es el año calendario, en donde el año 0 será el del inicio de las erogaciones y n es el número de años del horizonte de evaluación.

Posteriormente se determinó el flujo de efectivo que, si se pagara cada año, tendría el mismo valor presente (VPC); éste será el costo anual equivalente y está dado por la expresión (7):

$$CAE = VPC \left[ \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \right] \tag{7}$$

dónde: CAE es el costo anual equivalente (\$); VPC es el valor presente del costo total del proyecto (\$); m es el número de años de vida útil del activo y r es la tasa social de descuento. El método de riego más conveniente fue aquel que presentó el menor CAE. Si la vida útil de los activos, mediante los métodos de riego analizados es la misma, la comparación entre éstos se realiza únicamente a través del valor presente de los costos de los métodos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, el mes de máxima demanda fue febrero con un coeficiente unitario de riego (CUR) de  $0.73 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ; considerando una eficiencia global de 73.5%, el CUR calculado fue de  $0.99 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . El CUR obtenido con el programa estadístico Cropwat 8.0 consideró un tiempo de operación del sistema por día de 24 h, en este caso, para el diseño agronómico de la zona de estudio se consideró un tiempo de operación por día de 22 h por lo que se estimó un factor de corrección de 0.91. El CUR resultante para el sistema de riego fue de  $1.08 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . El gasto máximo del sistema ( $Q_{\text{max}}$ ) obtenido fue de  $278.19 \text{ L s}^{-1} \approx 280 \text{ L s}^{-1}$ .

El gasto en los hidrantes fue de  $40 \text{ L s}^{-1}$ , con una presión de operación de  $1.5 \text{ kg cm}^{-2}$ . Para el sistema de riego en conjunto, la presión requerida por el método de turnos fue de  $3.1 \text{ kg cm}^{-2}$  y utilizando el método de Clement fue de  $2.6 \text{ kg cm}^{-2}$  (Cuadro 1).

La longitud total de tubería fue de 14 652 m, para una superficie física de 257.59 ha, donde los mayores costos de inversión se presentaron en el sistema diseñado por el método de Clement, con excepción del costo del equipo de bombeo y la obra eléctrica, donde fueron menores; y el costo de la obra civil cárcamo de bombeo no tuvo variación (Cuadro 2 y 3).

En la estimación del valor presente de los flujos de costos y beneficios se adoptó una tasa social de

descuento del 12%, correspondiente a la recomendada por la SHCP para reflejar el valor real de los recursos públicos y privados a ser empleados durante la ejecución y operación del programa. Los indicadores de rentabilidad reflejaron que los sistemas de riego de ambos métodos son rentables, debido a que por un lado el VPN es mayor a cero, la TIR es mayor al 12% (tasa social de descuento recomendada por la SHCP) y la relación B/C es mayor a 1 (Cuadro 4).

El valor presente del costo total (VPC) y el costo anual equivalente (CAE), considerando los costos de inversión, operación, mantenimiento y reparaciones fueron menores en \$ 1 421 924.42 y \$ 176 522.90, respectivamente, para el método de Turnos en comparación con los de Clement, lo cual representa una diferencia del 11.6% (Cuadro 5); tomando en cuenta estos valores el método de Turnos resulta ser más conveniente. Por el contrario, considerando solamente los costos de operación, mantenimiento y reparaciones se observa que el VPC y el CAE son menores en \$ 91 659.40 y \$ 11 378.93, respectivamente, para el método de Clement en comparación con el de Turnos, lo cual representa una diferencia del 1.7% (Cuadro 5); tomando en cuenta estos valores el método más conveniente resulta ser el de Clement. Este análisis se llevó a cabo debido a que los proyectos de infraestructura hidroagrícola en México son subsidiados en el monto de adquisición y el usuario aporta los gastos de operación y mantenimiento durante su vida útil.

El sistema de riego logra el uso óptimo y sostenible de los recursos hídricos, permitiendo la gestión del agua con estrategias de manejo adecuadas, tal y como lo mencionan Planells *et al.* (1999); además de conseguir la rentabilidad de la inversión en infraestructura hidroagrícola; por ende, se incrementa la superficie de producción debido a que se mejora la eficiencia global del riego, garantizándose un suministro oportuno de agua, para incrementar el rendimiento de la producción agrícola.

**Cuadro 1. Resultados del diseño hidráulico por los métodos de Turnos y Clement.**

Método	Diámetros	Sistema		Tomas o hidrantes	
		P	Q	P	Q
	mm	kg cm <sup>-2</sup>	L s <sup>-1</sup>	kg cm <sup>-2</sup>	L s <sup>-1</sup>
Turnos	400, 355, 315, 250, 200, 160	3.1	280	1.5	40
Clement	450, 400, 355, 315, 250, 200, 160	2.6	280	1.5	40

**Cuadro 2. Costos para el sistema diseñado con el método de Turnos.**

Concepto	Unidad	Cantidad	Importe (M.N.)
			\$
Tubo PVC C/C C-5 160 mm (6")	m	6114	581 582.02
Tubo PVC C/C C-5 200 mm (8")	m	5376	792 266.50
Tubo PVC C/C C-5 250 mm (10")	m	1932	443 803.58
Tubo PVC C/C C-5 315 mm (12")	m	312	113 426.04
Tubo PVC C/C C-5 355 mm (14")	m	378	141 693.30
Tubo PVC C/C C-5 400 mm (16")	m	540	264 864.60
Instalación de tubería	Lote	1	93 505.44
Accesorios y conexiones	Lote	1	327 269.05
Movimiento de tierras	Lote	1	944 060.36
Tren de descarga	Lote	1	257 158.69
Obra civil cárcamo de bombeo	Lote	1	250 139.35
Equipo de bombeo	Lote	1	439 690.45
Obra eléctrica	Lote	1	758 828.30
Total			5 408 287.68

El requerimiento de riego calculado muestra las necesidades de agua del cultivo que se debe proporcionar con el riego para garantizar condiciones óptimas de desarrollo (FAO, 2006); no obstante, el requerimiento varía a lo largo de la República Mexicana, donde existen grandes diferencias climáticas y de distribución de lluvia.

Como lo mencionan Rodríguez *et al.* (2006), el diseño óptimo de la red de distribución tiene aspectos de tipo hidráulico, rentabilidad, disponibilidad de tuberías, calidad de agua y distribución óptima de la demanda. Mismos que llevan a determinar el método más adecuado en determinado proyecto. Los aspectos

**Cuadro 3. Costos para el sistema diseñado con el método de Clement.**

Concepto	Unidad	Cantidad	Importe (M.N.)
			\$
Tubo PVC C/C C-5 160 mm (6")	m	1 644	156 382.20
Tubo PVC C/C C-5 200 mm (8")	m	4 266	628 684.70
Tubo PVC C/C C-5 250 mm (10")	m	4 314	990 977.60
Tubo PVC C/C C-5 315 mm (12")	m	2 334	848 514.00
Tubo PVC C/C C-5 355 mm (14")	m	864	323 870.40
Tubo PVC C/C C-5 400 mm (16")	m	312	153 032.88
Tubo PVC C/C C-5 450 mm (18")	m	918	562 532.04
Instalación de tubería	Lote	1	146 559.75
Accesorios y conexiones	Lote	1	512 959.13
Movimiento de tierras	Lote	1	972 925.08
Tren de descarga	Lote	1	285 731.88
Obra civil cárcamo de bombeo	Lote	1	250 139.35
Equipo de bombeo	Lote	1	399 718.59
Obra eléctrica	Lote	1	689 843.91
Total			6 921 871.51

**Cuadro 4. Indicadores de rentabilidad para los métodos de Turnos y Clement.**

Método	Indicadores de rentabilidad		
	VPN	TIR	Relación B/C
	\$	%	
Turnos	2615	16.20	1.24
Clement	1193	13.63	1.10

mencionados fueron estudiados en el presente trabajo y se definió la viabilidad de los métodos con base en los costos de inversión, operación y mantenimiento.

En el método de Clement existió menor pérdida de energía al utilizar un diámetro mayor, conduciendo el mismo gasto dadas las condiciones de operación; mientras que en el método por Turnos, la pérdida de energía es mayor y al someterse a un tandeo riguroso de operación se puede conducir el mismo gasto con un diámetro mayor (Cuadro 1).

El costo del sistema por el método de Turnos es menor que el del método de Clement en \$1 513 583.83, lo cual representa una diferencia del 22%. Esto, se debe principalmente a que hay un requerimiento de tubería con distintos diámetros en cada método; así para el primer método se ocuparon diámetros de tubería de 160 a 400 mm para su funcionamiento, mientras que para el segundo método se emplearon diámetros de 160 a 450 mm (Cuadro 2 y 3), confirmado esto por Monserrat *et al.* (2012), con la ventaja del método de Clement en que el agricultor decide el momento y lámina de riego.

Tarjuelo *et al.* (2006) compararon el método de Clement con la generación de curvas aleatorias de demanda diaria (CADD) y comprobaron que el primer método sobreestima el caudal en la cabecera de la red de un 35 a 40%, tal y como resultó en el presente estudio. En contraparte tiene la ventaja de originar sistemas con mayor capacidad de conducción, lo que

incrementa la flexibilidad en el sistema de riego y mejora la velocidad de respuesta en el suministro de agua.

El estudio mostró la evaluación de costos de acuerdo a la SHCP (2012), cumpliendo para ambos métodos de diseño con los parámetros necesarios para ser métodos rentables, mediante un VPN mayor a cero y una TIR mayor al 12% (Cuadro 4). Por tanto, lo que definirá al método de diseño son las condiciones económicas, sociales y de operación del sistema.

En lo que se refiere a la operación del sistema, el método de Turnos presentó mayor costo comparado con el método de Clement, debido a un mayor consumo de energía eléctrica derivado de una mayor demanda de potencia (175 HP) en el equipo de bombeo para la operación del sistema, mientras que para el método de Clement se requieren 150 HP. En cuanto al mantenimiento y reparación del sistema, se observó que en el diseño utilizando el método de Clement los costos fueron mayores en comparación al diseño con el método de Turnos, debido a que con el método de Clement se requirió de diámetros de tubería más grandes. El método a emplear está relacionado con la disponibilidad de agua, las condiciones sociales y económicas, y las restricciones de distribución del sistema, como lo menciona Holzapfel *et al.* (2009).

Por lo anterior, el método de diseño por Clement se recomienda en sistemas de riego a hidrante parcelario con bombeo donde se disponga de apoyos económicos para la inversión inicial, tales como programas de tecnificación del riego, donde el gobierno o estado aporta un porcentaje del costo del sistema, y solo se consideren costos de operación, mantenimiento y reparaciones; en contraparte, el método de diseño por Turnos se recomienda en sistemas de riego a hidrante parcelario sin bombeo, cuando se tengan pocos usuarios y se consideren deban absorber todos los costos del sistema de riego; además de ser una alternativa factible gracias a la gestión automática aplicada a las redes

**Cuadro 5. Evaluación de costos inversión, operación, mantenimiento y reparaciones de los métodos de Turnos y Clement.**

Método	Con inversión inicial		Sin inversión inicial	
	VPC	CAE	VPC	CAE
	\$			
Turnos	10 855 729.15	1 347 669.92	5 447 441.47	676 265.31
Clement	12 277 653.57	1 524 192.82	5 355 782.07	664 886.38

de distribución que permite superar el problema de coordinación entre los hidrantes al momento de regar, tal y como lo señala Monserrat *et al.* (2012); confirmando que en cuanto más rigidez experimenta la demanda los diseños serán más económicos.

## CONCLUSIONES

- El diseño hidráulico del sistema de riego, aplicando el método por Turnos genera mayores pérdidas de energía, por lo que requiere diámetros de tubería menores con respecto al diseño del sistema de riego usando el método de Clement, éste último origina sistemas con mayor capacidad de conducción, lo que incrementa la flexibilidad en el sistema de riego y mejora la velocidad de respuesta en el suministro de agua.

- Al considerar los costos de inversión inicial, operación, mantenimiento y reparaciones, el valor presente del costo total del proyecto y el costo anual equivalente fueron menores al usar el método de diseño por Turnos que los obtenidos en el método de Clement. Sin embargo, al considerar únicamente los costos de operación, mantenimiento y reparaciones, el valor presente del costo total del proyecto y costo anual equivalente fueron menores al usar el método de Clement; este último generó un costo de inversión inicial mayor al tener un sistema con más capacidad de conducción, pero, a mediano y largo plazo los costos de operación se reducen en forma significativa. Además, proporciona una mayor flexibilidad en el funcionamiento hidráulico, por lo que dicho método resulta ser más conveniente para el diseño de los sistemas de riego, especialmente para aquellos diseños donde los usuarios reciben apoyos económicos para su implementación, donde el método de Clement es la mejor opción.

## LITERATURA CITADA

- Ángeles M., V. 2000. Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado (aspersión, microaspersión y goteo). Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.
- Catalán V., E. A. y M. M. Villa C. 2009. Sistema experto para el manejo eficiente del riego parcelario. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Durango, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas del agua en México. Edición 2008. SEMARNAT. México, D. F.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2010. CROPWAT 8 (freedownloadmanager.org.). Land and Water Development Division of FAO. Roma, Italia.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F.
- Herwin, E. C. 1981. The economics of irrigating field vegetables in the United Kingdom. *Acta Hort.* (ISHS) 119: 381-384.
- Holzapel, E. A., X. Pardo, V. P. Pardo, A. Rodríguez, X. Orrego y M. A. López. 2007. Análisis técnico-económico para selección de aspersores. *Rev. Brasil. Eng. Agric. Amb.* 11: 557-563.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. ERIC III. Extractor rápido de información climatológica, Versión 2.0. México.
- Lorite, I., E. A. Holzapel y A. Pannunzio. 2009. Sistemas de riego. pp: 13-26. *In:* A. Fernández, E. Holzapel, I. Del Callejo y M. Billib. (eds.). Proyecto KASWARM. Manejo sostenible del agua para riego en Sudamérica. Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-25074-1-1.
- Monserrat V., J., A. Alduán, L. Cost R. y J. Barragán F. 2012. ¿Turnos o demanda? en el proyecto de redes de distribución de riego a presión. Universidad de Lérida. Cataluña, España. <http://hdl.handle.net/10459.1/45935>. (Consulta: marzo 20, 2012).
- Pannunzio, A. 2009. Estudios de sustentabilidad de los sistemas de riego por goteo en arándanos en el norte de Buenos Aires. p. 95-118. *In:* A. Fernández Cirelli, E. Holzapel, I. del Callejo y M. Billibi (eds.). Manejo sostenible del agua para riego en Sudamérica. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Peña P., E. 2007. Tecnificación del riego presurizado. pp: 1-89. *In:* B. León Mojarro y B. D. Robles R. (eds.). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. ISBN 9689513044.
- Planells, P., F. J. Ortega, M. Valiente, J. Montero y J. M. Tarjuelo. 1999. Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. *Ing. Agua* 6: 27-36.
- Rodríguez V., K., O. A. Fuentes M., M. R. Jiménez M. y F. Luna C. 2006. Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de abastecimiento urbano de agua. João Pessoa, Brasil. [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoD%20\(3\).pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoD%20(3).pdf). (Consulta: marzo 24, 2012).
- SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público). 2012. Metodología para la evaluación de proyectos de construcción de infraestructura hidroagrícola. SHCP. México, D. F. [www.hacienda.gob.mx](http://www.hacienda.gob.mx). (Consulta: marzo 22, 2012).
- Tarjuelo, J. M., M. A. Moreno, P. Planells y J. F. Ortega. 2006. Presión y caudal necesarios en cabecera de redes de riego a la demanda según la calidad de servicio deseada. Taller: Políticas y estrategias para el uso del agua en la agricultura en Iberoamérica. [http://ceer.isa.utl.pt/cyted/mexico2006/tema%203/20\\_JMTarjuelo\\_Espana.pdf](http://ceer.isa.utl.pt/cyted/mexico2006/tema%203/20_JMTarjuelo_Espana.pdf) (Consulta: marzo 24, 2012).

Tun-Dzul, J. de la C., G. Ramírez-Jaramillo, I. Sánchez-Cohen, C. T. Lomas-Barrié y A. de J. Cano-González. 2011. Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el distrito 048 Ticul, Yucatán. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1: 5-18.

WCADI (Weizmann Computer Aided Design Irrigation). 2008. Software para diseño de sistemas de riego automático WCADI 2008. Zichron Ya'acov, Israel.