

# Sistema de Riego para Invernaderos Hidropónicos Basado en la Evapotranspiración del Cultivo

A. Rojas<sup>1</sup>, A. Noriega<sup>2</sup>, G. Herrera<sup>2</sup>, R. Chaparro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Informática, <sup>2</sup>Facultad de Ingeniería C.U.  
Av. Universidad Esq. Gabino Barreda s/n. Querétaro, Qro. C.P. 76010  
Tel. (4) 2 16 84 30 Ext 116 Fax (4) 2 16 64 52  
[arojas@sunserver.uaq.mx](mailto:arojas@sunserver.uaq.mx)

## Resumen

Para obtener un mejor uso del agua, se requiere modificar la gestión de los cultivos, el suelo y el agua. Las posibles estrategias son la selección de cultivos y la utilización de métodos mejorados de siembra. Ésta última engloba el empleo de invernaderos hidropónicos, en los cuales se requiere un estricto control sobre el balance de sustancias químicas en la solución de irrigación que proporciona los nutrientes necesarios a la planta, así como su correcto suministro. Por ejemplo, el mal funcionamiento en el sistema de riego provocará estrés hídrico, rápido marchitamiento y muerte de la planta. Existen varios trabajos sobre este tema, la mayoría de ellos están basados en una programación del riego por tiempo, que emplean un modelo de evapotranspiración del cultivo derivado de la ecuación de Penman-Monteith para determinar las necesidades hídricas del cultivo. En este trabajo, se presenta una metodología para determinar las necesidades hídricas de los cultivos en invernadero hidropónico y su distribución durante el ciclo de cultivo, con el objetivo final de implementar un sistema automático de riego.

**Palabras clave :** hidroponía, evapotranspiración.

## Abstract

Improving water usage has required, and requires, more effective management of water, crops, and soil. The strategies to make this possible are the selection of appropriate crops and the use of improved planting methods. The latter includes the use of hydroponic greenhouses, which require a strict control to maintain the balance of chemicals in the irrigation solution that furnishes the necessary nutrients to the plant, as well as the correct supply of that solution. For example, a malfunction in the irrigation system could result in hydric stress, quick wilting and finally, death of the plant. There are several works on this topic, most of them based either on fixed interval scheduling or on the crop transpiration model derived from the Penman-Monteith equation to determinate the hydric requirements of the crop. Presented in this article is a methodology to determinate the hydric requirements of crops in a hydroponic greenhouse and the distribution of these requirements along the crop's cycle with the final objective of implementing an automatic irrigation system.

**Key words :** hydroponic, crop transpiration.

## Introducción

La hidroponía se define como un sistema de producción donde las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material generalmente inerte y estéril, el cual proporciona las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal.

El interés por esta técnica de cultivo obedece fundamentalmente a los mayores rendimientos que, por unidad de superficie, se pueden obtener 100 a 3000 % más que el cultivo convencional en el suelo (Jensen y Collins, 1976).

El desarrollo de una tecnología agrícola que permita un uso más eficiente del agua es de vital importancia para el país, ya que en México la disponibilidad de

agua es cada vez menor. La mayor parte de la demanda de agua proviene de la agricultura, por ejemplo, en Querétaro, un estado principalmente industrial, la Comisión Estatal de Agua (CEA) estima que del volumen anual extraído, de aproximadamente 850 millones de m<sup>3</sup>, el 84% se destina a uso agrícola; el 9% para agua potable y servicios, el 4% para uso industrial y el 2.5% restante para abrevadero y uso doméstico.

Uno de los puntos más importantes que se deben considerar para establecer un medio ambiente controlado de agricultura hidropónica es el uso de computadoras, las cuales pueden operar cientos de dispositivos en un invernadero (ventilación, calefacción, válvulas mezcladoras, válvulas de irrigación, cortinas, luces, etc.) utilizando parámetros de entrada tales, como temperatura externa e interna, humedad, velocidad y dirección del viento.

Con respecto al sistema de riego, las computadoras pueden recolectar y almacenar informaciones relevantes tales como temperatura, humedad, niveles de luz y radiación solar; con el fin de analizar la influencia de estos factores en los requerimientos de agua por parte del cultivo en su desarrollo y, finalmente, en la calidad del producto (Jensen, 1971). Sin embargo, la mayoría de las veces, el costo de algunos de estos sensores suele ser elevado.

En los cultivos hidropónicos se utilizan dos tipos de sistemas de riego: abiertos y cerrados. Desde un punto de vista técnico y económico, un sistema de riego abierto no tiene recirculación de la solución nutritiva y proporciona la ventaja de no tener que efectuar periódicamente costosos análisis químicos y evita además complicaciones técnicas relacionadas con la recirculación como las alteraciones en el pH, acumulación de sales o iones tóxicos, transmisión de enfermedades, etc. (Jensen, 1971).

Uno de los sistemas de riego más utilizados es el de riego por goteo, el cual consiste en la aplicación del riego con solución nutritiva directamente al pie de las plantas mediante una red de cintas de goteo que atraviesan las camas (sustrato de soporte a la planta) y dejan salir el agua y la solución nutritiva con un determinado caudal (Ponce, 2001).

Como ya es bien conocido, la mayor parte del agua absorbida por las plantas se pierde ya sea en forma líquida o en forma de vapor a través de un proceso llamado transpiración que depende de las condiciones climáticas. Por otro lado, la evaporación

es el agua perdida en forma de vapor por el terreno o superficie de agua adyacente a la planta, o por la superficie de las hojas de las plantas. La pérdida de agua por transpiración sumada a la de la evaporación se conoce como evapotranspiración (*ETc*).

Se debe aplicar la cantidad justa de riego para cubrir el consumo de agua del cultivo o *ETc* (Jensen *et al.*, 1990). Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizantes, lo cual contribuye a la contaminación de aguas subterráneas. Una aportación inferior a la *ETc* puede llegar a provocar déficit hídrico y, por tanto, una reducción de la producción.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un conjunto de procedimientos técnicos (programación del riego) adecuados para predecir cuánto y cuándo regar en invernaderos que no tengan la posibilidad de contar con sensores de alto costo, implementando de esta forma un sistema automático de riego a bajo costo.

## Materiales y Métodos

La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) cuenta con un invernadero con cubierta de polietileno y una superficie de 1000 m<sup>2</sup>, el cual tiene sensores de humedad interna y externa, temperatura externa y cuatro sensores de temperatura interna colocados en diferentes lugares dentro de él. Los sensores se encuentran conectados a una computadora que adquiere datos cada 5 minutos. Además, está equipado con ventilación natural, calefacción a gas y una malla sombra para disminuir la radiación solar dentro del invernadero. Cuenta también con sensores externos de radiación solar, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento situados a 500 m del invernadero.

El cultivo trabajado es el jitomate, a razón de 2.5 plantas por m<sup>2</sup> utilizando un sustrato de tezontle. Se utilizaron los datos temperatura, humedad, velocidad de viento, radiación solar y presión atmosférica recolectados durante el año 2001 para efectuar los cálculos de evapotranspiración y, por lo tanto, obtener un estimado de los requerimientos de riego para el año 2002, partiendo de la base de que los factores climáticos no cambian radicalmente de un año a otro.

Según Fernández (2001), la evapotranspiración de un cultivo se puede calcular de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ETc = ET_o * Kc \quad (1)$$

donde  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo de tomate,  $ET_o$  la evapotranspiración de un cultivo de referencia y  $K_c$  es el coeficiente de cultivo.

El cálculo de  $ET_c$  puede hacerse en tiempo real o tiempo medio según los datos climáticos que se empleen para estimar la  $ET_c$  (Jensen y Wright, 1978).

El cálculo en tiempo real de  $ET_c$  se realiza a partir de datos climáticos obtenidos del día anterior. El cálculo en tiempo medio de  $ET_c$  se efectúa a partir de datos climáticos medios obtenidos de años anteriores, sin embargo, se requiere que estos datos tengan escasa variación interanual y que las precipitaciones sean escasas. (Ferreira *et al.*, 1981; Hanson, 1996). Se han efectuado comparaciones de las  $ET_c$  obtenidas con ambos métodos y un  $ET_c$  medido y no se han encontrado diferencias significativas. (González *et al.*, 2001).

Para el experimento, se llevó a cabo el cálculo en tiempo medio de  $ET_c$  empleando los datos recolectados durante el año 2001 y la fórmula FAO-Penman-Monteith (1990).

Fernández (2001) establece que el coeficiente de cultivo  $K_c$  integra los efectos de tres características primarias que diferencian un cultivo de una pradera de gramíneas, las cuales son altura de cultivo, resistencia y albedo de superficie suelo-cultivo.

El patrón de  $K_c$  de los cultivos hortícolas depende de la temperatura, por lo cual es necesario relacionar los valores de  $K_c$  con el desarrollo y crecimiento del cultivo.

Para abordar el problema del efecto de la fecha de plantación sobre el patrón de  $K_c$  se han desarrollado dos modelos que relacionan el  $K_c$  con el desarrollo del cultivo a través de la temperatura: el modelo  $K_c$ -IAF y el modelo  $K_c$ -Tiempo térmico.

El modelo  $K_c$ -IAF se utiliza para cultivos que se manejan sin podas de formación o deshojados.

El modelo  $K_c$ -tiempo térmico se emplea para cultivos con podas de formación frecuentes, deshojados y destallados, para los cuales se estableció una relación empírica entre el  $K_c$  y el tiempo térmico, que es función de la temperatura. La base para establecer esta relación fue la dependencia de la evolución del  $K_c$ , hasta alcanzar cobertura completa, con el desarrollo del cultivo, y éste con la temperatura. El

modelo detallado de  $K_c$ -TTA (tiempo térmico acumulado) es el siguiente:

$$\text{Si } TTA < 200 \quad K_c = 0.2 \quad (2)$$

$$\text{Si } 200 < TTA < 722 \quad (3)$$

$$K_c = K_{\min} + 0.00268 * (TTA - 200) \quad (4)$$

$$\text{Si } TTA > 722 \quad K_c = K_{c_{\max}} \quad (4)$$

El tiempo térmico acumulado desde emergencia ( $TTA$ ) se obtiene a partir de las temperaturas máxima y mínima diarias y tres valores de temperatura característicos del cultivo que definen su respuesta a la temperatura: temperatura base ( $T_b$ ), temperatura óptima ( $T_{op}$ ), y temperatura umbral superior ( $T_{\max}$ ).

Las expresiones empleadas para calcular el tiempo térmico diario ( $TT$  °C) son:

$$\text{Si } T_{\max} < T_{op} \text{ y } T_{\min} < T_b \quad (5)$$

$$TT = \frac{(T_{\max} - T_b)^2}{2(T_{\max} - T_{\min})}$$

$$\text{Si } T_{\max} < T_{op} \text{ y } T_{\min} > T_b \quad (6)$$

$$TT = 0.5 * (T_{\min} + T_{\max}) - T_b$$

$$\text{Si } T_{\max} > T_{op} \quad (7)$$

$$TT = \frac{1}{(T_{\max} - T_{\min})} * \left[ \frac{(T_{op} - T_{\min})^2}{2} + \right.$$

$$(T_{\min} - T_b) * (T_{op} - T_{\min}) +$$

$$\left( \frac{1}{1} (T_{\max} - T_{op}) * (T_{op} - T_b) * \right.$$

$$\left. \left( 0.5 + \frac{0.5 * (T_{us} - T_{\max})}{T_{us} - T_{op}} \right) \right) \right]$$

$$TTA = \sum_0^t TT \quad (8)$$

El día 0 corresponde a la fecha de trasplante y  $t$  es el día actual.

De acuerdo a las ecuaciones (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8), es posible determinar el  $K_c$  para un día en particular de manera que aplicando la ecuación (1) a los valores obtenidos de  $K_c$  y  $ET_o$ , es posible determinar la  $ET_c$  para ese día. Como se ha mencionado con anterioridad, con el riego se debe de

aplicar la cantidad justa para cubrir las necesidades de agua del cultivo o *ETc*.

Sin embargo, para aplicar el riego, hay que tomar en cuenta la eficiencia del sistema de riego, ya que por diversas causas los emisores de una instalación de riego por goteo no son exactamente iguales entre sí, lo cual ocasiona que los cultivos reciban dosis de riego diferentes. El coeficiente de uniformidad (CU) nos permite medir la uniformidad del sistema de riego, y se define como el cociente entre el caudal medio descargado por los emisores de más bajo caudal y el caudal medio de todos los emisores.

$$CU = \frac{PCaudal_{bajo}}{PCaudal_{prom}} \quad (9)$$

$$f = \frac{1}{CU} \quad (10)$$

También se debe considerar la necesidad de lavado de sales. Para disolver y separar las sales se debe aplicar una cantidad de agua adecuada que permita la infiltración a través de la totalidad del sistema radicular. A esta cantidad de agua, se le denomina *fracción de lavado (FL)*.

$$FL = \frac{CEi}{2 * MaxCEe} \quad (11)$$

donde CEi es la conductividad del agua de riego MaxCEe es la mínima conductividad eléctrica que reducirá la cosecha a cero

$$f' = \frac{1}{1 - FL} \quad (12)$$

De manera que la dosis brutas de riego diario *Rb*, teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego y la fracción de lavado de sales, se calcula mediante la ecuación:

$$Rb = ETc * f * f' \quad (13)$$

Para el cálculo del *Rb* del invernadero de prueba se utilizaron los datos recolectados por los sensores del invernadero durante el año 2001. En la Figura 1, se muestra el promedio mensual de algunos.

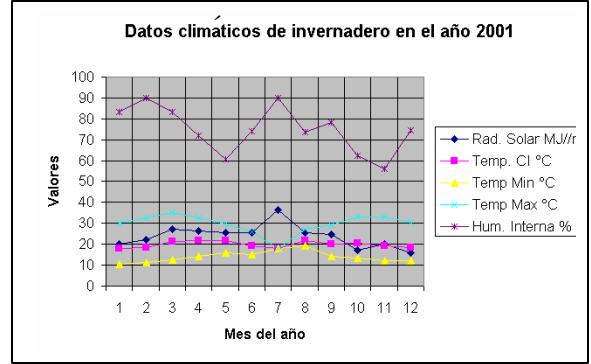


Figura 1. Datos climáticos correspondientes al año 2001.

Con los valores mostrados en la Figura 2, y aplicando la fórmula FAO Penman-Monteith (1990), se determinó el valor de la evapotranspiración de referencia *ETo* para el invernadero de prueba.

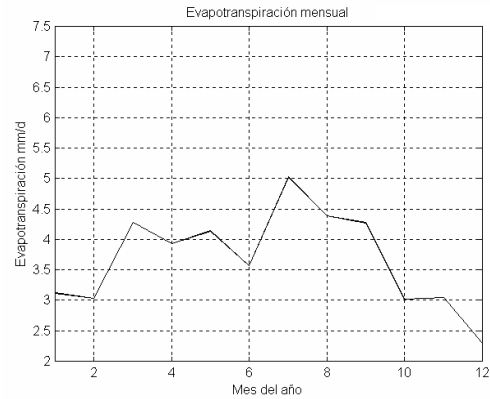


Figura 2. Evapotranspiración Eto.

Para el cálculo del *Kc* correspondiente a cultivos trasplantados durante los meses de enero a marzo de 2002, se utilizaron los datos de temperatura recolectados en ese año y las ecuaciones (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8). De tal forma que se obtuvo una tabla de coeficientes de cultivo correspondiendo cada *Kc* a una fecha de transplante y una fecha determinada deseada.

## Resultados y Discusión

En la Figura 3 se muestra la evolución del *Kc* durante dos meses, para una planta trasplantada el 1 de enero de 2002.

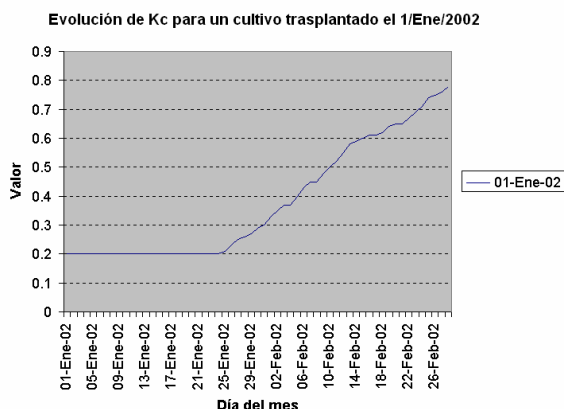


Figura 3. Evolución de  $K_c$  para un cultivo trasplantado el 1 de enero de 2002.

Una vez determinados los valores de  $ET_o$  y de  $K_c$  se aplicó la ecuación (1), para obtener el  $ET_c$  de un cultivo en una fecha determinada. La Figura 4 muestra la  $ET_c$  obtenida para un cultivo trasplantado el 1 de enero de 2002 y durante un periodo de dos meses.

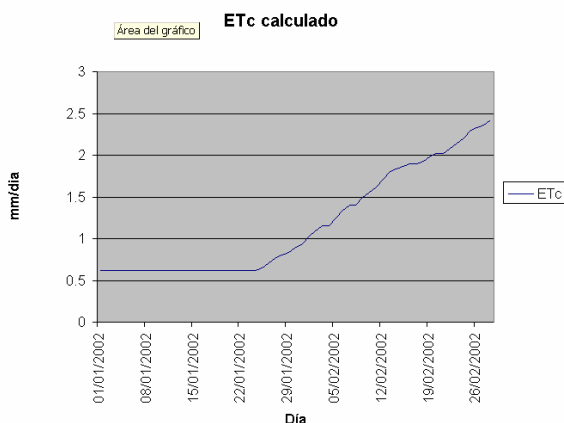


Figura 4. Evolución de  $ET_c$ .

Como se puede observar en la Figura 4, la  $ET_c$  está estrechamente relacionada con  $K_c$ , ya que a mayor crecimiento de la planta se incrementan sus necesidades de agua.

Para determinar el  $R_b$  se, requiere conocer el valor de  $f$  y  $f'$ . En el invernadero de prueba se tiene que el caudal medio descargado por los emisores de más bajo caudal es de 3.5 l/h y el caudal medio de todos los emisores es de 3.9 l/h. De ahí que aplicando las ecuaciones (9) y (10), se obtiene que el valor de  $f$  es de 1.1147. Para el cálculo de  $f'$  se tomaron los valores de  $CE_i$  que se maneja en el invernadero y el cual es de 1.7 ds/m, el valor  $MaxCE_e$  es obtenido de tablas

(Fernández, 2001) y es de 12.5 ds/m, por lo cual aplicando las ecuaciones (11) y (12), se obtuvo un valor de  $f'$  igual a 1.0730.

Hasta este momento, se ha resuelto el problema de ¿cuánto debo regar el día de hoy?, siendo  $R_b$  un estimador de la lámina de riego a aplicar que permite programar los riegos.

Con este método es posible calcular las necesidades de riego bruto  $R_b$  de un invernadero a partir de datos históricos, que se colectan por sensores de temperatura, humedad, radiación solar y presión atmosférica, ubicados en el invernadero, o por datos recolectados en una estación climatológica cercana, la cual puede proporcionar datos a varios invernaderos. Sin embargo, el  $R_b$  calculado con ambos tipos de datos requiere un ajuste para adecuarlo a las necesidades en tiempo real de un invernadero en particular. En este caso, se procede a aumentar o disminuir en un porcentaje el riego programado  $R_b$ .

La segunda parte de la programación de riego propuesta consiste en ajustar el riego programado de acuerdo a la edad de la planta y a la temperatura observada en tiempo real en el invernadero que puede diferir de la temperatura ideal (28 a 30 °C), para el caso del tomate. Por ejemplo, en el caso de una temperatura alta, digamos 36 °C, no se aumentará en la misma magnitud el riego programado a una planta de una semana de edad que a una planta de 17 semanas a la misma temperatura.

Por lo anterior, se procedió a realizar una serie de reglas que permiten decidir que cantidad de agua se debe aumentar al riego programado, con base en la edad del cultivo y la temperatura adquirida en tiempo real. Por ejemplo, a temperaturas altas, se aplica un 50% más del riego programado si el cultivo tiene de 12 a 20 semanas; un 35% si el cultivo tiene de 6 a 11 semanas y un 20% si el cultivo tiene de 1 a 5 semanas.

De esta manera, si se quiere determinar la cantidad de riego a aplicar el 6 de mayo de 2002, a una planta de tomate, trasplantada el 1 de enero del 2002 y no se tienen disponibles los datos de radiación solar y presión atmosférica; el procedimiento a seguir consiste en observar el  $R_b$  (riego programado) calculado por el método antes propuesto, el cual es de 4.36 l/m<sup>2</sup>d.

En la Figura 5 se observa que las condiciones de temperatura del 6 de mayo de 2001 y del 6 de mayo

de 2002 son similares; pero no iguales, e incluso en ésta última, se sobrepasó la temperatura ideal para el tomate ( $28-30^{\circ}\text{C}$ ), a partir de las 11:00 horas. De manera que el riego programado no satisfará las necesidades reales de la planta.

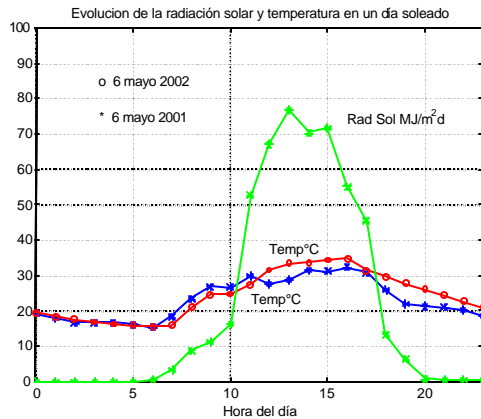


Figura 5. Evolución de temperatura y radiación solar en un día soleado.

Aplicando las reglas obtenidas se puede determinar el porcentaje de ajuste para el riego programado  $Rb$ .

En la Figura 6, se observa la diferencia entre el riego programado y el riego aplicado a la planta, también se advierte que el riego aplicado difiere del riego programado en un porcentaje equivalente a la edad del cultivo y a la temperatura registrada.

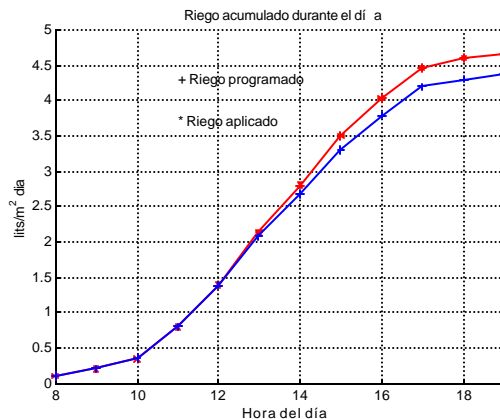


Figura 6. Riego acumulado durante un día.

Una vez controlada la situación de las necesidades del cultivo. La cuestión sobre ¿cuándo aplicar?, se soluciona tomando como base la temperatura acumulada durante el día. De esta forma se obtiene una distribución de riego que es mayor cuando la

temperatura es mayor y, por ende, las necesidades del cultivo son mayores.

En el caso del invernadero de prueba, la distribución se realizó, durante un horario de las 8:00 a las 19:00 h. La Figura 7 muestra la cantidad de riego que se debe aplicar por hora.

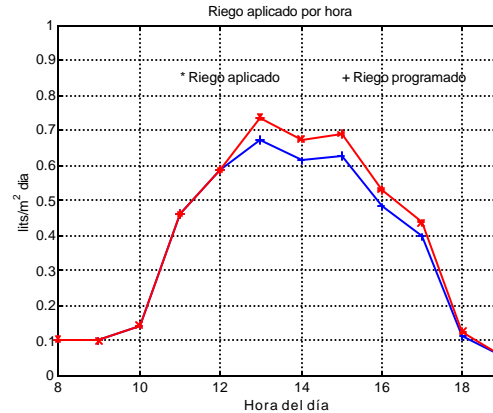


Figura 7. Riego aplicado por hora durante un día.

Como siguiente paso, la cantidad de riego a aplicar por hora se convirtió a los minutos de riego correspondientes, tal y como se muestra en la Figura 8.

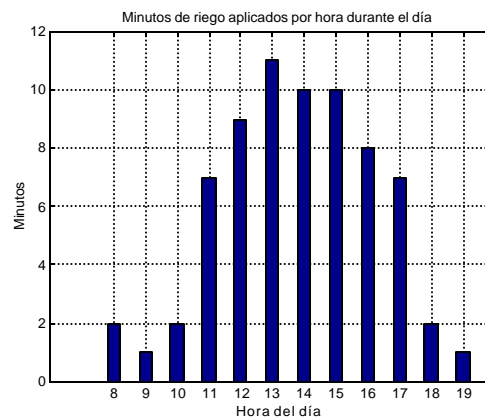


Figura 8. Minutos de riego aplicados por hora.

El método de programación de riego propuesto requiere de una computadora PC 286 ó 386, una tarjeta de adquisición de datos sencilla, además controladores para las bombas de riego. En este caso, el costo de este sistema está alrededor de \$300 dólares (E. U.). En el caso que se deseen instalar sensores de temperatura y humedad al costo anterior habría que agregar \$70 dólares (E. U.).

En síntesis, se realizaron experimentos utilizando el método propuesto para determinar el *Rb* programado, así como el sistema de ajuste de riego. Durante el transcurso del experimento, no se presentó estrés hídrico en el cultivo. En comparación con el método por programación de tiempo (que es el otro método que se aplica en el invernadero), se obtuvo un ahorro de 7 % en el total de litros administrados.

## Conclusiones

En los casos en los cuales no es posible contar con sensores de radiación solar y presión barométrica, se puede obtener un *Rb* programado o aproximado con datos proporcionados por fuentes cercanas (un invernadero equipado, una estación meteorológica), e incluso por datos proporcionados por la FAO para las distintas regiones del mundo. Posteriormente este *Rb* se puede ajustar aplicando las reglas y relaciones observadas por los expertos, aprovechando de esta forma su experiencia y conocimientos. La metodología propuesta por Fernández (2001) se puede aplicar a invernaderos hidropónicos siempre y cuando se realicen los ajustes necesarios tal y como se propone en este trabajo para satisfacer la demanda real del cultivo.

Este método de programación de riego establece las bases para la realización de un sistema automático de riego a bajo costo.

## Agradecimientos

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ), por el apoyo que ha proporcionado para la realización de este trabajo.

## Literatura Citada

FAO. 1990. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, Annex V FAO Penman-Monteith Formula.

Ferres, E., R. E. Goldfien, W. O. Pruitt, D. W. Henderson, R. M. Hagan. 1981. Assisted Irrigation Scheduling for Water and Energy Conservation in the 80's. Amer. Soc. Agric. Engn. Publ. 20-81; 202-207.

Fernández, M., D. 2001. Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Cajamar.

González A. M., S. Bonachela, M. D. Fernández, M. Gallardo, S. Cruz. 2001. Uso de un programa de riego medio en un cultivo de tomate en invernadero y suelo enarenado en Almería. IV Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas-Associacao Portuguesa de Horticultura. Cáceres 7-11 de Mayo del 2001.

Hanson, B. R. 1996. Error in using historical reference crop evapotranspiration for irrigation scheduling. Proc. ASAE International Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Nov. 3-6, San Antonio, Texas: 220-224.

Jensen, M. H. 1971. Use of controlled environment for vegetable production in desert regions of the world, Hortscience 6: 33-36.

Jensen, M. H. and W. L. Collins. 1976. Hydroponic vegetable production, Hort. Rev. 7: 483-558.

Jensen, M. E. and J. L. Wright. 1978. The role of evapotranspiration models in irrigation scheduling. Trans. ASAE.21: 82-97.

Jensen, M. E., R. D. Burman, R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manual N° 70. 332 p.

Ponce, O. J. 2001. Manejo de un sistema hidropónico bajo invernadero, 6° simposium internacional de ferti-irrigación, mesa 3: invernaderos.

Recibido: 20 de septiembre de 2002

Aceptado: 1 de abril de 2003