

8. Efecto de la uniformidad de riego en el rendimiento económico de un cultivo

E. López-Mata, J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan,
R. Ballesteros, A. Domínguez

José Arturo de Juan Valero: Contacto: Arturo.Juan@uclm.es

José María Tarjuelo: Contacto: Jose.Tarjuelo@uclm.es

Eulogio López-Mata: Contacto: Eulogio.Lopez@uclm.es

Rocío Ballesteros: Contacto: Rocio.Ballesteros@uclm.es

Alfonso Domínguez: Contacto: Alfonso.Dominguez@uclm.es

Investigadores, Centro Regional de Estudios del Agua (crea),
Universidad de Castilla-La Mancha.

8.1. Resumen

Actualmente existen numerosos modelos capaces de simular el comportamiento de los cultivos bajo diferentes condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, ninguno de estos modelos tiene en cuenta el efecto de la uniformidad de aplicación del agua con el riego sobre el rendimiento. El modelo desarrollado simula el efecto de la uniformidad sobre el rendimiento de los cultivos y su repercusión sobre el margen bruto. La aplicación del modelo a un cultivo de maíz en la provincia de Albacete, indica que el porcentaje de superficie que interesa mantener adecuadamente regado, desde un punto de vista económico es variable en función de la disponibilidad de agua de riego para el cultivo y de la uniformidad del agua en el suelo. Los resultados ofrecidos por el modelo pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

Palabras clave: coeficiente de uniformidad, riego deficitario, modelos, margen bruto.

8.2. Introducción

Debido a la tendencia generalizada a la disminución de disponibilidad de agua para la agricultura, y a los incrementos en los costos de la energía, se está volviendo cada vez más importante el uso eficiente del agua y la energía en la agricultura. Estos aspectos condicionan la via-

bilidad de las actividades de riego en muchas regiones del mundo.

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua queda almacenada en la zona del suelo explorada por las raíces, sino que parte se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda, siendo muy diferente la cuantía de cada tipo de pérdida según el tipo de suelo y sistema de riego empleado. En consecuencia, la falta de uniformidad puede afectar al rendimiento de la cosecha y a la eficiencia en el uso del agua (Warrick and Gardner, 1983; Letey et al., 1984; Mantovani et al., 1995; Li, 1998).

Una continua reducción en la disponibilidad de agua para la agricultura ha creado la necesidad de mejorar la eficiencia del uso del agua por la planta (EUA, "Eficiencia del Uso del Agua" o WUE, "Water Use Efficiency") (Hatfield et al., 2001). Desde un punto de vista agronómico, la EUA es definida como la relación entre el rendimiento (Y) y la evapotranspiración del cultivo (ET) (López Bellido, 1998). Dada la dificultad de medir el agua realmente consumida por el cultivo, la mayoría de las publicaciones se refieren a la relación entre rendimiento y agua recibida por el cultivo, tanto la proveniente de la lluvia como del riego, y calculando la eficiencia del agua recibida por el cultivo (EARC o EWRC "Efficiency of Water Received by the Crop"). Howell (2001) indica que la principal forma de incrementar la EARC en la agricultura irrigada es reduciendo las pérdidas de agua y la degradación de la calidad del agua (aspectos ambientales) y relocalizar el

agua a otros usos de mayor prioridad (aspectos sociales).

La uniformidad de rendimiento del cultivo, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en la zona radicular. Ésta es condicionada por los efectos de los riegos acumulados recibidos, la intercepción del agua por la canopia y su redistribución, la dinámica del agua en el suelo y del desarrollo del sistema radicular del cultivo. (Stern and Bresler, 1983; Li and Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para obtener la lámina bruta de aplicación para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo, debería considerarse la uniformidad de agua del suelo más que la uniformidad de aplicación de eventos individuales de riego. Una buena aproximación a la uniformidad de agua del suelo es el valor correspondiente al conjunto de eventos de riego, al menos cuando el intervalo entre riegos es menor que tres o cuatro días (Ortega et al., 2004a and b; de Juan et al., 2008; Jiménez et al., 2009).

Desde mediados del pasado siglo se vienen desarrollando numerosas ecuaciones para simular el comportamiento de los cultivos bajo diferentes condiciones de estrés (De Wit, 1958; Stewart et al., 1977; Sudar et al., 1981), fertilización (Cerrato and Blackmer, 1990; Stöckle and Debaeke, 1997; Errhebi et al., 1998), salinidad del agua de riego (Allen et al., 1998; García et al., 2006; Pereira et al., 2007), competencia con malas hierbas (Kropff and Spitters, 1993; Vitta and Satorre, 1999; Mansilla, 2005), etc. Estas

ecuaciones han sido utilizadas para desarrollar modelos complejos que permiten simular el comportamiento de los cultivos bajo un amplio rango de condicionantes (ISAREG: Teixeira and Pereira, 1992; CROPSYST: Stöckle et al., 1994; WOFOST: Boogaard et al., 1998; etc.). Sin embargo, ninguno de estos modelos tiene en cuenta el efecto de la uniformidad de la distribución del agua en el suelo ocasionado por la heterogeneidad del agua aplicada con el riego sobre el rendimiento del cultivo y el margen bruto obtenido.

8.3. Objetivo

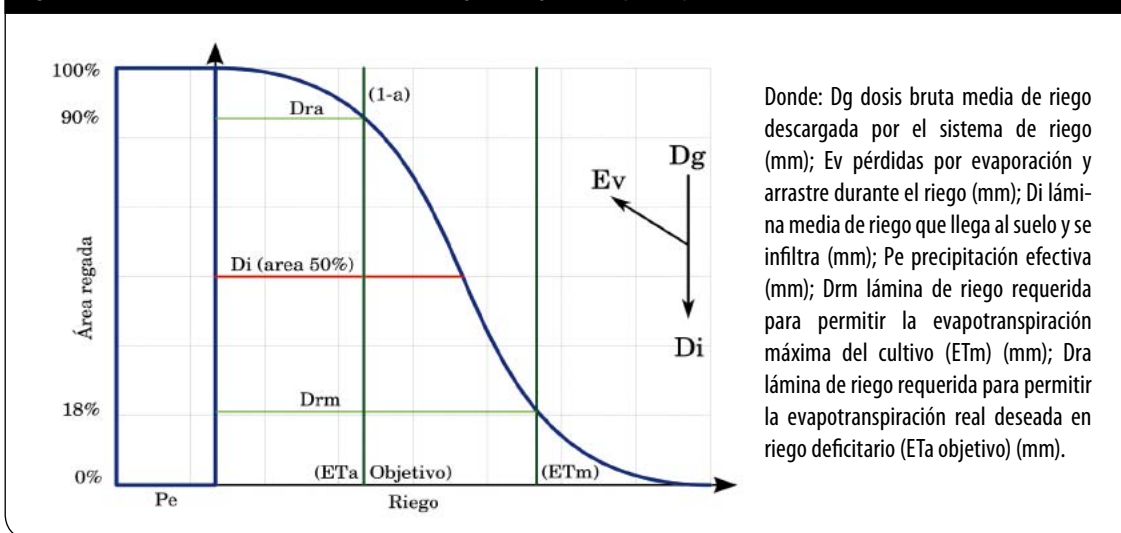
El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología capaz de optimizar la aplicación del agua de riego a los cultivos, buscando maximizar el margen bruto para unas disponibilidades de agua limitadas, teniendo en cuenta la uniformidad del agua de riego.

8.4 Materiales y métodos

La función de distribución normal es capaz de reproducir con suficiente precisión la distribución del agua aplicada con sistemas de riego por aspersión y goteo, así como la distribución de agua en el suelo. (Seginer, 1987; Keller y Bliesner, 1990; Anyoji y Wu, 1994; Mantovani et al., 1995; de Juan et al., 2008; Jiménez et al., 2009).

La Figura 1 muestra un diagrama típico de la distribución del agua en un riego presurizado cuando se infiltra en el suelo una lámina de riego D_i .

Figura 1: Función normal acumulada de distribución del agua de riego sobre la parcela para un determinado Coeficiente de Uniformidad (CU).



La distribución de la lámina infiltrada (D_i) puede aproximarse con una distribución normal acumulada de media (D_i) y desviación estándar (σ), que dependerá de la uniformidad del agua aplicada por el sistema de riego (Keller y Bliesner, 1990, Tarjuelo, 1999).

Como consecuencia de la falta de uniformidad, implícita a cualquier sistema de riego, habrá una determinada proporción del área regada (a) que recibirá la altura requerida para que el cultivo pueda alcanzar la evotranspiración pretendida (D_{ra}) o más, mientras que la porción (1-a) habrá recibido una lámina inferior.

Normalmente área adecuadamente regada (a) es el área de la parcela de cultivo que permite satisfacer la evapotranspiración máxima del cultivo (ET_m) con la lámina infiltrada (DRM), que en la Figura 1 sería de un 18%. Este concepto puede ser ampliado para el caso de un determinado objetivo de riego deficitario (ET_a objetivo), donde se debe infiltrar una lámina (D_{ra}), que en la Figura 1 corresponde a un área adecuadamente regada del 90%.

Para medir la uniformidad de distribución del agua riego, el coeficiente de uniformidad (CU) de Christiansen (1942) (EC. 1) suele ser el más utilizado.

Ecuación 1

$$CU = 100 \cdot \left(1 - \frac{|\sum V_i - D_i|}{D_i \cdot n} \right)$$

Donde: D_i valor medio del agua en los puntos de control (mm); n número total de puntos de control; V_i valor del contenido de agua de cada punto de control (mm).

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular. Ésta, está condicionada por: el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior redistribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, 1983; Li y Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para el cálculo de la lámina bruta a aplicar a partir de las necesidades de agua requeridas por el cultivo debe utilizarse

la uniformidad del agua en el suelo, y no la uniformidad de aplicación de agua por el sistema de riego, incluyendo además el valor correspondiente al conjunto de riegos, al menos cuando el intervalo entre riegos es inferior a tres o cuatro días (Ortega et al.; 2004a y b). En sistemas fijos de riego por aspersión en maíz (Martínez 2004, de Juan et al., 2008), en cebolla (Jiménez 2008, Jiménez et al., 2009), y en riego con equipos pivote en remolacha azucarera (Ortiz et al., 2009), ponen de manifiesto que con valores de $CU \geq 80\%$ en riegos individuales, se pueden alcanzar fácilmente uniformidades de agua en el suelo próximas al 90%.

El coeficiente de variación (CV) es el cociente entre la desviación estándar de las alturas de agua aplicadas en los diferentes puntos de la parcela (σ) y la altura media de agua infiltrada (D_i) (Ec. 2).

Ecuación 2

$$CV = \frac{\sigma}{D_i}$$

Al tratarse de una distribución normal es posible relacionar CU con CV (Warrick et al., 1989; Heermann et al., 1991) (Ec. 3).

Ecuación 3

$$CV = \frac{1 - CU}{\sqrt{2/\pi}}$$

Con el fin de estimar el efecto sobre el rendimiento de los cultivos del CU medio del agua en el suelo correspondiente al conjunto de riegos, se divide la parcela de riego en "m" porciones iguales discretizando así la distribución normal acumulada, con lo que la lámina de agua de riego que recibe cada porción será distinta. El valor de "m" es definido por el usuario.

Para conocer cuál es el valor del agua infiltrada en cada una de las m subparcelas para un riego unitario ($D_i = 1$) que se infiltrará en la subparcela media, se utilizan la distribución normal

estándar inversa, la desviación estándar (σ) y la posición correspondiente a la subparcela (A_q). En este caso, como $D_i = 1$, será $\sigma = cv$ (Ec. 2). El valor de A_q puede asociarse al punto medio de la subparcela considerada mediante la Ec. (4).

Ecuación 4

$$A_q = \frac{q - 0.5}{m}$$

Donde: A_q es la posición de la subparcela q (variable entre 1 y m) dentro del área total de la parcela; m es el número de subparcelas en que se divide la parcela total.

De esta manera, cada riego es transformado en m riegos diferentes, distribuidos en las m subparcelas definidas por el usuario, aproximando así lo que ocurre en un riego real en la parcela. La metodología anterior permite al modelo incorporar el efecto de la uniformidad del agua disponible en el suelo sobre el rendimiento de los cultivos.

Cálculo del rendimiento del cultivo

Para estimar el rendimiento de un cultivo para un determinado nivel de déficit hídrico se utiliza la ecuación de Stewart et al. (1977) (Ec. 5), considerando cuatro etapas en el proceso de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Esta metodología es válida para la mayoría de las especies herbáceas, pudiendo obtener también un buen nivel de aproximación para algunas especies leñosas (Stewart et al., 1977, Doorenbos y Kassam, 1979).

Ecuación 5

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^4 \left(1 - k_{yi} \left(1 - \frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right) \right)$$

Donde: Y_a rendimiento obtenido (kg/ha); Y_m rendimiento máximo en la zona, bajo condiciones óptimas de cultivo y en ausencia de estrés hídrico (kg/ha); k_{yi} coeficiente de estrés del cultivo para la etapa i de desarrollo del cultivo; ET_{ai} evapotranspiración real acumulada en la etapa i (mm); ET_{mi} evapotranspiración máxima acumulada en la etapa i (mm) para producir Y_a e Y_m respectivamente.

El cálculo diario de la ET_m se realiza a partir de los valores de ET₀ y k_c del cultivo, calculando la ET₀ a partir de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) o la de Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985).

Para el cálculo de la ET_a bajo condiciones de déficit hídrico se utiliza la expresión propuesta por Allen et al. (1998) (Eq. 6)

Ecuación 6

$$\frac{ET_a}{ET_m} = K_{se} = \frac{TAW - Drs}{TAW - RAW} = \frac{TAW - Drs}{(1 - p)TAW}$$

Donde K_{se} es el factor de reducción de evapotranspiración dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo (adimensional) (0 - 1), donde $K_{se}=1$ cuando $Drs \leq RAW$; Drs es el déficit de humedad en la zona radicular (mm) en un momento dado; RAW es el agua fácilmente disponible en la zona radicular (mm); TAW el total de agua disponible en la zona pedicular (mm); p es la fracción de TAW que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico

El modelo permite obtener el calendario de riegos para cada relación ET_a/ET_m objetivo. Para ello calcula diariamente el contenido de agua en la zona radicular mediante un balance de entradas (riego, lluvia y, en su caso, incremento de la profundidad radicular) y salidas (ET y percolación). Bajo condiciones de estrés hídrico, la Eq. (6) permite determinar la cantidad de agua a aplicar mediante el riego para intentar conseguir la relación ET_a/ET_m objetivo. Puesto que es necesario trabajar con cuatro etapas del cultivo, el modelo busca la combinación de déficit por etapas que conseguiría la máxima producción para una determinada relación ET_a/ET_m global.

Para una determinada relación ET_a/ET_m objetivo, que puede ser distinto para cada una de las cuatro etapas del cultivo, el modelo establece un calendario de riegos que trata de conseguir dicho objetivo. Una vez determinado el calendario de riegos, el modelo calcula las relaciones ET_a/ET_m realmente conseguidas en cada una de las etapas.

Una vez conseguidas las producciones obtenidas para cada una de las m subparcelas, se

procede a su integración utilizando las reglas se Simpson de 1/8 y 3/8 de forma combinada para una mayor precisión.

Optimización de la distribución del agua de riego por etapas

Puesto que los cultivos presentan una sensibilidad al estrés hídrico diferente a lo largo de su desarrollo vegetativo, según la relación ETA/ETM en cada una de las etapas de desarrollo del cultivo es posible obtener producciones distintas para una misma relación ETA/ETM total (Mitchell et al., 1984; Fabeiro et al., 2003). Por lo tanto, para una misma H_b es posible mejorar el rendimiento final si se reduce el estrés hídrico durante las etapas más sensibles, restringiendo el riego en el resto de etapas. Esta técnica se denomina Riego Deficitario Controlado (Jordan, 1983; English, 1990).

Para realizar una aproximación de la distribución del déficit en cada una de las cuatro etapas del cultivo tratando de conseguir el máximo rendimiento final, se ha desarrollado una metodología, aplicable a una situación del pasado, por ejemplo al año climático medio. El procedimiento utilizan los valores de k_y y de la ETM acumulada en cada una de las etapas. Puesto que el rendimiento del cultivo depende del déficit en las cuatro etapas consideradas en la Eq. (5), para cualquier relación $(ETA/ETM)=K$ en el ciclo global del cultivo, se deberá cumplir que:

Ecuación 7

$$K.ET_m = ET_a = ET_{a1} + ET_{a2} + ET_{a3} + ET_{a4}$$

Lo que permite poner $ETA1$ en función de la ETA en las otras tres etapas:

Ecuación 8

$$ET_{a1} = K.ET_m - ET_{a2} - ET_{a3} - ET_{a4}$$

Despejando Ya de la Eq. (5), y teniendo en cuenta que Ym es conocida, así como los valores de k_y y ETM en cada etapa, pueden realizarse las derivadas parciales de Ya respecto de $ETA2$, $ETA3$, $ETA4$. Igualando a cero estas derivadas puede obtenerse el valor máximo de Ya en función de la ETA para cada una de las cuatro etapas consideradas Eq. (9a, 9b y 9c). Esta metodología utiliza la ecuación de Stewart sin tener en cuenta los posibles efectos que el déficit de agua, el coeficiente de uniformidad, el tipo de suelo y/o la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo tendrían sobre los valores máximos de Ya alcanzados en cada etapa. Esto hace que la aproximación pueda ser mejor para bajas relaciones ETA/ETM y para baja capacidad de retención de agua en el suelo.

Los valores de $ETAi$ en Eq. (9a, 9b y 9c) deben cumplir las restricciones de: $ETAi \geq ETais$ correspondiente a la situación de secano, y $ETAi \leq ETMi$.

Ecuación 9

$$ET_{a2} = \frac{K.ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) - \frac{1}{4} \left(ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) + ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) + ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) \right) \quad 9a$$

$$ET_{a3} = \frac{K.ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) - \frac{1}{4} \left(ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) + ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) + ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) \right) \quad 9b$$

$$ET_{a4} = \frac{K.ET_m}{4} + \frac{3}{4} ET_{m4} \left(1 - \frac{1}{k_{y4}}\right) - \frac{1}{4} \left(ET_{m2} \left(1 - \frac{1}{k_{y2}}\right) + ET_{m3} \left(1 - \frac{1}{k_{y3}}\right) + ET_{m1} \left(1 - \frac{1}{k_{y1}}\right) \right) \quad 9c$$

El proceso requiere explorar las 34=81 soluciones diferentes, seleccionando aquella que origine el rendimiento máximo ($Y_a \max$), cumpliendo todas las restricciones.

Una vez estimados los déficits en cada una de las etapas que conducen al máximo rendimiento del cultivo, se calcula el calendario de riegos para la subparcela media (área 50% en Figura 1) y se determina el agua recibida y la producción obtenida en el conjunto de subparcelas en que se ha dividido la parcela regada para tener en cuenta la uniformidad de distribución del agua en el suelo.

Cálculo del Margen Bruto (GM)

El cálculo de margen bruto se realiza mediante la Eq. (10).

Ecuación 10

$$GM = Y_a \cdot HP + Y'_a \cdot HP' + Sub - Dg \cdot WC - VC$$

Donde: GM es el margen bruto (€/ha); Y es el rendimiento del producto principal (kg/ha); PV es el precio de venta del producto principal (€/kg); Y' es el rendimiento del subproducto (kg/ha); PV' es el precio de venta del subproducto (€/kg); cv son los costes variables de producción (€/ha); Hb es la lámina bruta de agua descargada por el sistema de riego (m³/ha); ca es el coste del agua de riego (€/m³); Subs son los subsidios percibidos por los agricultores (€/ha). En esta ecuación se han separado los costes imputados a la aplicación del agua de riego para poder estudiar el efecto del coste del agua sobre el resultado final.

El modelo tiene en cuenta que distintos niveles de rendimiento suponen un uso diferente de los medios de producción y por tanto de los costes variables. Por este motivo, el usuario debe introducir el importe de los costes variables dependiendo del objetivo de producción.

8.5. Resultados y discusión

Para llevar a cabo la calibración del modelo se ha elegido un cultivo de maíz en la zona de Albacete (España), donde el rendimiento máximo esperado del cultivo, sin restricciones en el proceso productivo (si el cu del sistema de riego fuera del 100% y la relación $\eta_a/\eta_m = 1$), sería

de 17.000 kg/ha. La Tabla 1 muestra los datos económicos asociados al cultivo del maíz en la zona. Los datos climáticos utilizados corresponden al año 2005, que fue un año seco, con 250 mm de lluvia anual y 45 mm durante el periodo de cultivo.

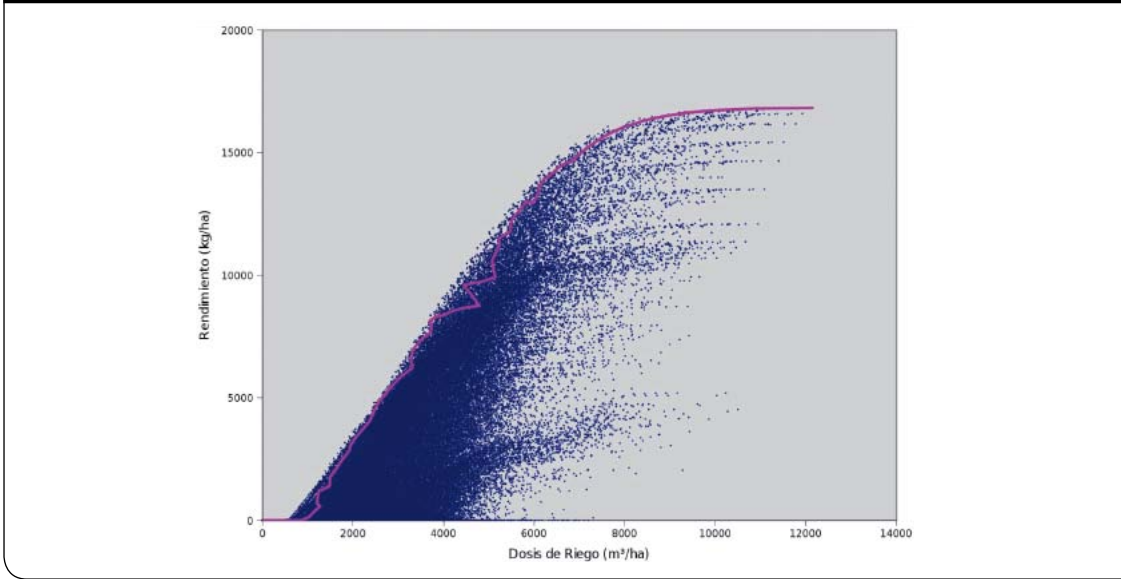
Tabla 1. Datos económicos asociados al cultivo del maíz en el sistema agrario Mancha Oriental.

Datos de maíz	
Precio de venta (€/ton)	142.30
Subsidios (€/ha)	346.50
Coste del agua (€/m ³)	0.09
Estimación de los costes variables	
Rendimiento	Costes variables
(kg/ha)	(€/ha)
17,000	1,451.02
13,625	1,318.74
10,800	1,182.74
8,300	1,043.28
0	922,30

Para una determinada dosis de riego aplicada al cultivo, pueden obtenerse diferentes producciones dependiendo del calendario de riegos utilizado. En la Figura 2 se muestran los resultados correspondientes a 146410 calendarios de riego simulados, para un $cu=85\%$, variando la relación η_a/η_m , y la proporción de área adecuadamente regada "a", donde se puede comprobar que para una misma aportación de agua de riego se obtienen producciones muy diferentes.

La mayor eficiencia en el uso del agua (wue), entendida ésta como el rendimiento del cultivo por cada m³ de agua utilizado, corresponde a la envolvente superior de la nube de puntos obtenida en la Figura 2, al corresponder a los puntos la producción máxima para cada una de las láminas de riego brutas aplicadas. Pero simular una gran cantidad de calendarios de riego para obtener la envolvente es muy costoso en tiempo de cálculo, por ese motivo el modelo hace uso del optimizador de déficit por etapas descrito anteriormente en la metodología. Su efectividad puede comprobarse superponiendo la curva obtenida por el modelo a la nube de puntos de la simulación de 146410 calendarios de riego (Figura 2). El optimizador de déficit descrito se acerca bastante a la envolvente con tiempos de

Figura 2: Simulación de 146410 calendarios de riego y resultados del optimizador de distribución del déficit por etapas (línea continua).



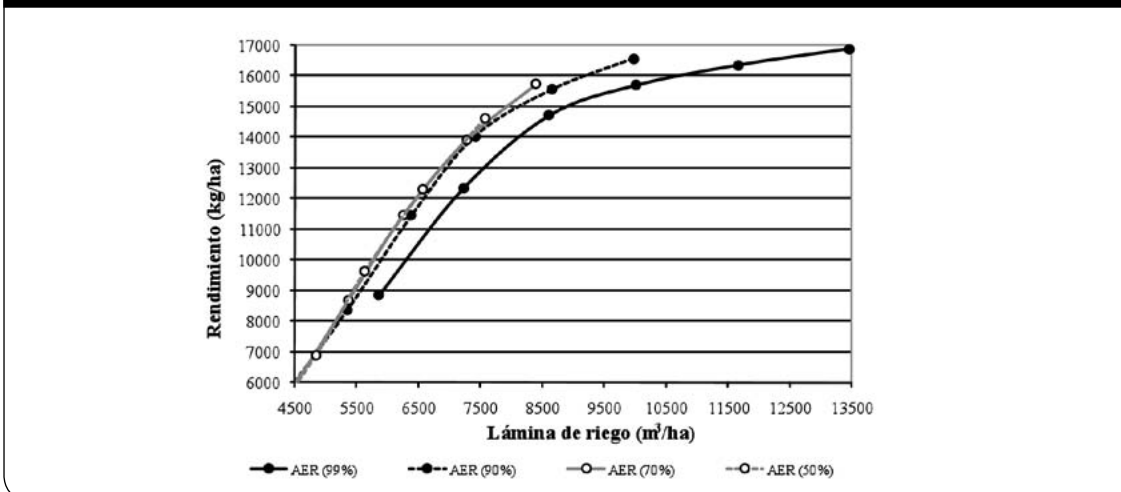
cálculo pequeños. Actualmente se está trabajando en otro optimizador de déficit mucho más complejo, pero que se espera que se aproxime aún más a la envolvente óptima del cultivo.

En la Figura 3 se muestra la relación “rendimiento vs. lámina bruta de riego” para distintos porcentajes de área adecuadamente regada, considerando un $CU = 85\%$, para seis valores de la relación ETA/ETM distintas (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5), lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva.

Los resultados muestran que no es razonable pretender dejar bien regada el 100% de la parcela ya que, para una misma lámina bruta de riego aportada (D_g), se obtendría menos producción que dejando bien regada menor proporción de parcela. Según esto, puede ser suficiente dejar bien regada o sobre regada entre el 70-80% de la parcela. En este caso, la mayor eficiencia en el uso del agua se consigue con valores de “a” entre 50% y 70%.

La Figura 4 muestra el efecto del área adecuadamente regada (a) sobre el rendimiento cuando se

Figura 3: Relación “rendimiento vs. lámina bruta de riego” para cuatro porcentajes de área adecuadamente regada (99%, 90%, 70%, 50%), para un $CU = 85\%$, considerando seis valores de la relación ETA/ETM distintas (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5), (lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva).



trata de mantener constante el valor medio de la relación ETa/ETm en toda la parcela.

Como puede verse en la Figura 4, el máximo rendimiento se consigue cuando la casi totalidad de la parcela evapotranspira ETm , lo que requiere altos valores de "a". No obstante, la eficiencia en el uso del agua disminuye más rápidamente cuanto mayor es el valor de "a" a partir de ciertos valores de agua de riego aplicada (unos 7.000 m³/ha en el ejemplo). Por tanto, la combinación entre "a" y la relación media de ETa/ETm en la parcela puede conseguir resultados muy diferentes para una misma dosis de riego.

Con el fin de poner de manifiesto la influencia del CU se ha elaborado la Figura 5. En la misma se comparan los distintos rendimientos esperados en función del valor del CU del agua en el suelo, para tres valores de área adecuadamente (A) y para cuatro niveles de ETa/ETm .

Como puede verse en la Figura 5, para una misma relación ETa/ETm , se consigue mayor rendimiento cuanto mayor es el valor de CU , con la misma dosis de riego. Estos resultados se han confirmado con los resultados de campo realizados en la zona. El máximo rendimiento se obtendría con $ETa/ETm = 1$, pero no compensa-

Figura 4: Relación "rendimiento vs. lámina bruta de riego" para distintas relaciones eta/etm , considerando UN $CU = 85\%$, variando el valor del área adecuadamente regada "a", entre 0,5 y 0,99 (lo que corresponde a cada uno de los puntos de cada curva).

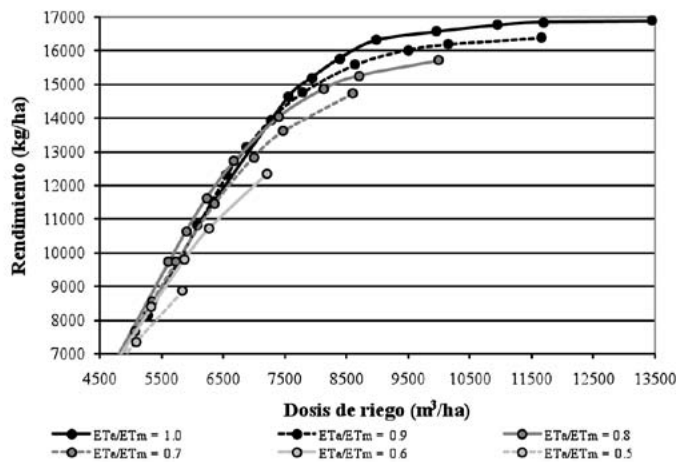
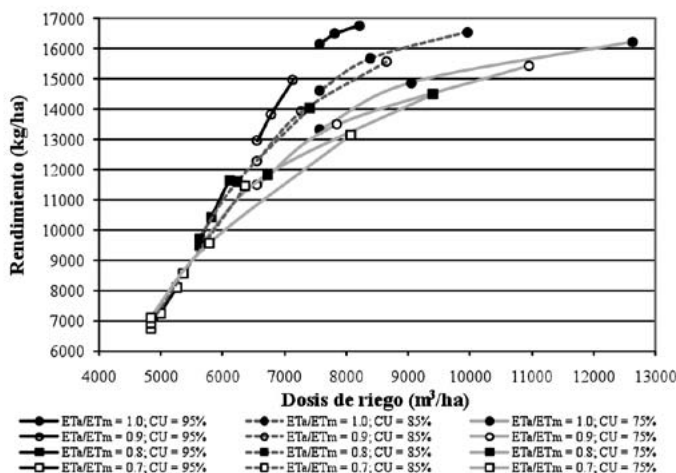


Figura 5: Relación "rendimiento vs. lámina bruta de riego" para distintas combinaciones de ETa/ETm y CU , cuando el valor de "a" toma los valores de 90%, 70% y 50%, (correspondiendo a los tres puntos representados de cada curva).



ría pasar de un valor de “a” de 70% al 90%, por el escaso incremento de rendimiento frente al gran incremento de consumo de agua que supone. Este hecho se ve más acentuado cuanto más bajos son los valores de CU

La Figura 6 muestra los márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la Figura 2, así como la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas para un CU del agua en el suelo del 85%.

La Figura 7 muestra las funciones optimizadas que estiman la envolvente superior de las relaciones “margen bruto vs. lámina bruta de riego” para tres valores de CU (95, 85 y 75%). Los resultados ponen de manifiesto la estrategia de riego que maximiza el margen bruto de una explotación, donde puede verse el efecto tan importante que tiene la uniformidad del agua en el suelo sobre el margen bruto del cultivo. De acuerdo con la Figura 6, cuanto mayor es el CU, mayor es el margen bruto obtenido para una determinada dosis de riego aplicada.

Para los datos económicos considerados para el cultivo (Tabla 1), las Figuras 6 y 7 ponen de manifiesto que:

Cuanto mayor es el valor de CU, se logra un mayor margen bruto (MB) para una misma dosis de riego, siendo menor el efecto de CU para bajas dosis de riego.

El MB aumenta al hacerlo la dosis de riego aplicada, hasta un máximo, a partir del cual tiende a disminuir, en mayor proporción cuanto menor sea el valor de CU.

El máximo MB se consigue con una relación $ETA/ETM < 1$ y una proporción del área bien regada (A) inferior al 100%. El valor de “a” que conduce al máximo MB es mayor cuanto menor es la relación ETA/ETM .

En general, cuanto menor es el valor de “a”, mayor es la pendiente de la curva “margen bruto vs. lámina bruta de riego”, conduciendo a una mayor eficiencia económica en el uso del agua. Valores de “a” comprendidos entre el 50 y el 80% parecen adecuados para valores de $CU > 80\%$.

Para ilustrar la importancia de un adecuado calendario de riegos, se ha elaborado la Tabla 2. En ella se han simulado cuatro calendarios de riego diferentes para una situación en la que el agricultor dispone de 650 mm para riego de maíz. Se supone que se trata de un sistema fijo de riego por aspersión, que consigue un $CU = 85\%$ del agua en el suelo. El periodo de riego del maíz comprende desde mediados de mayo a primeros de septiembre. Las cuatro estrategias de riego a comparar son: Opción 1, baja frecuencia de riegos para tratar de reducir las pérdidas por evaporación y arrastre; Opción 2, alta frecuencia de riegos para tratar de reducir el estrés hídrico del cultivo; Opción 3, calendario óptimo, teniendo en cuenta la diferente respuesta al estrés hídrico

Figura 6: Márgenes brutos obtenidos en los 146410 calendarios de riego simulados en la Figura 2 junto con la envolvente resultante de aplicar el optimizador del déficit por etapas para un CU del 85%.

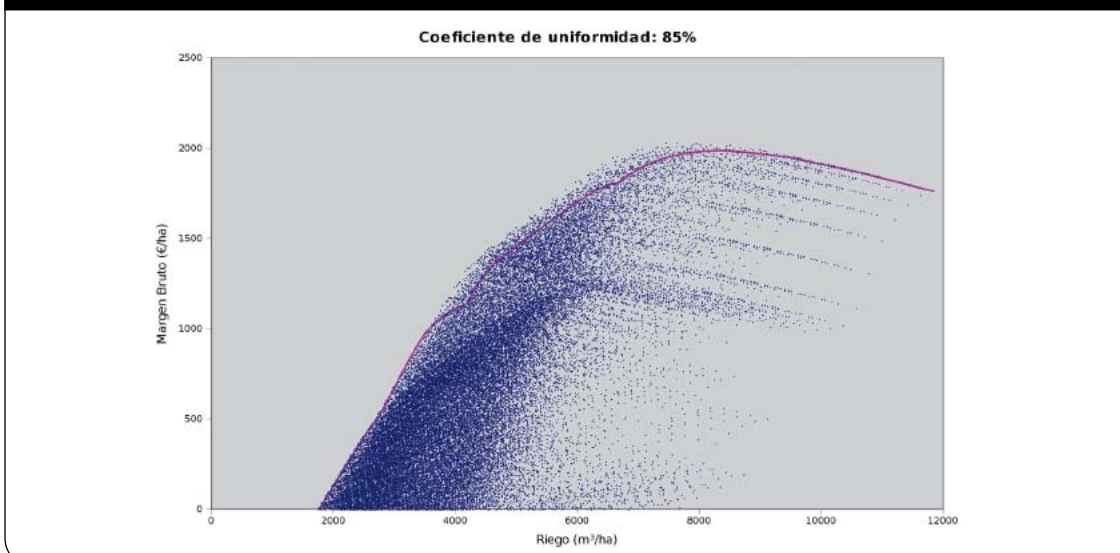
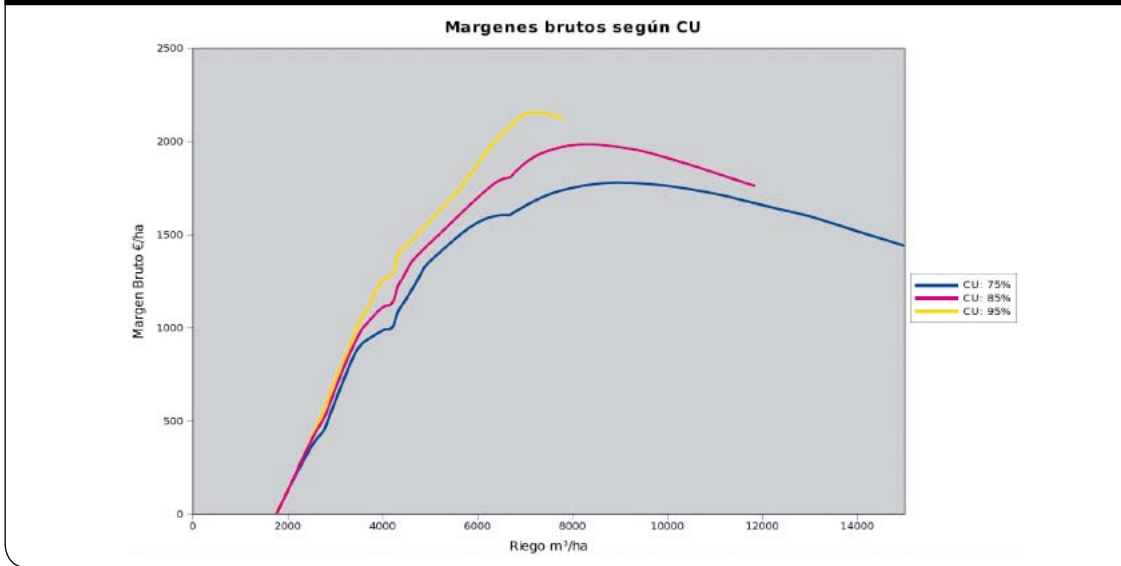


Figura 7: Relación “margen bruto vs. lámina bruta de riego” óptima para distintas combinaciones de ETa/ETm y CU.



del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo del mismo; Opción 4, calendario de riegos seguido normalmente por los agricultores en la zona, con intervalos entre riegos de 3 días en el periodo punta. Los calendarios 1, 2, y 3 han sido calculados por el modelo, mientras que el 4 ha sido introducido manualmente.

Las Opciones 1 y 2 son las que aplican el menor y el mayor número de riegos, respectivamente. Las Opciones 3 y 4 ofrecen valores intermedios en el número de riegos, aunque más cercanos a la Opción 2. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los calendarios de riego anteriores para los principales parámetros de decisión.

Tabla 2. Calendario de riegos para las opciones consideradas.

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Total
ETm (mm)	61,3	110,4	228,7	243,5	78,5	722,4
Lluvia efectiva (mm)	2,1	10,1	5,8	0,0	27,5	45,4
Número de riegos						
Opción 1 (modelo)	1	5	9	7	2	24
Opción 2 (modelo)	2	9	10	10	2	33
Opción 3 (óptimo)	3	7	7	10	2	29
Opción 4 (manual)	2	8	10	10	2	32
Dosis de riego (mm)						
Opción 1 (modelo)	10,5	63,4	266,1	241,8	68,1	650,0
Opción 2 (modelo)	28,3	65,8	288,2	228,1	39,7	650,0
Opción 3 (óptimo)	34,1	65,3	223,9	285,2	42,5	650,0
Opción 4 (manual)	20,0	90,0	250,0	250,0	40,0	650,0

Tabla 3. Efecto del calendario de riegos sobre el rendimiento y el margen bruto en un cultivo de maíz.

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
ETa/ETm*	0,70	0,90	Variable	Variable
“a” (%)	91	48	-	-
Rendimiento (kg/ha)	11.742	12.132	13.021	11.919
Margen bruto (€/ha)	1.060,3	1.114,2	1.238,6	1.084,8

Nota: * La relación eta/etm que aparece en la tabla se refiere al valor mínimo que debe alcanzar dicha relación en el área adecuadamente regada “a”.

La Opción 3 (óptima) es la que obtiene los mejores resultados de rendimiento y margen bruto, superando en un 9,2 % al rendimiento y en un 14,2 % al margen bruto del calendario de riegos normalmente seguido por los agricultores de la zona (Opción 4). La diferencia en el número de riegos entre estas dos opciones es de tan solo 3, poniendo de manifiesto la importancia de seleccionar adecuadamente el momento del riego y la dosis a aplicar en el mismo.

8.6. Conclusiones y recomendaciones

La modelización del efecto de la uniformidad del sistema de riego sobre el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de déficit proporciona una mejor aproximación a la realidad del riego en parcela.

La uniformidad del agua de riego afecta notablemente al rendimiento de los cultivos y a la eficiencia en el uso del agua, lo que impli-

ca un efecto importante en el margen bruto obtenido.

El porcentaje de superficie que conviene mantener adecuadamente (A) regado es variable en función de la disponibilidad de agua de riego y del CU del agua en el suelo.

Los resultados ofrecidos por el modelo pueden ser de gran ayuda a la hora de diseñar la estrategia de riego de cualquier zona regable con recursos hídricos limitados.

Agradecimientos: este trabajo se ha realizado dentro del marco de los Proyectos Europeos FLOW-AID “Farm Level Optimal Water Management: Assistant for Irrigation under Deficit” N° 036958 (GOCE), y DesURVEY “A Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification” (SUSTDEV-CT-2004-003950-2), financiados por la U.E.