

Evaluación de los sistemas de riego por aspersión en la Comunidad de Regantes “Río Adaja” y propuestas para la mejora del manejo del riego.

I. Naroua¹, L. Rodríguez Sinobas¹, R. Sánchez Calvo¹,

J. Rodríguez Ros²

¹Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

²Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid

Resumen.

La evaluación en campo de los sistemas de riego permite conocer el funcionamiento del mismo y establecer criterios de manejo que mejoren la eficiencia y los resultados del riego. En este trabajo se evaluaron en campo trece sistemas de riego por aspersión: diez pivotes centrales, dos de cobertura total y un ramal de avance frontal. Además se analizó la carta de riego propuesta por el fabricante en ocho de los pivotes y en el ramal de avance frontal y se determinó la uniformidad de distribución de agua del sistema expresada como coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU). Posteriormente, se seleccionaron las boquillas de los emisores con objeto de obtener una mayor uniformidad en la aplicación del agua considerando el supuesto de una distribución continua de caudal. Los resultados de la evaluación en campo mostraron que el 38% de los sistemas evaluados tienen una uniformidad de aplicación de agua del riego mala ($CU < 80$). Asimismo, el rendimiento de aplicación R_a del 31% de los sistemas está por debajo de lo requerido ($R_a < 0,75$) y el riego del 92% de los sistemas es deficitario. Por otra parte, la uniformidad de aplicación del agua calculada para las cartas de riego propuestas por el fabricante ofrecen valores de $CU < 80$ estimándose que el cambio de boquillas propuesto aumentaría su valor en la mayoría de los sistemas estudiados.

1. Introducción y objetivos

Dado que el agua es un bien cada vez más escaso y dado que la energía asociada a los sistemas de riego presurizados es cada vez más cara, los riegos deben ser más eficientes para poder mantener o incrementar la producción actual de los cultivos con una menor disponibilidad de agua y energía. Asimismo, los riegos del futuro deberán ser sostenibles con el medio natural. En este sentido, la evaluación en campo de los sistemas de riego permite evaluar su funcionamiento, y establecer criterios de manejo que mejoren su eficiencia y los resultados del riego.

La evaluación en campo de un sistema de riego por aspersión, permite determinar su eficiencia de aplicación de agua que está relacionada con la uniformidad de aplicación del agua y engloba las pérdidas por filtración profunda (debidas a la mala distribución del agua por el sistema); las pérdidas por escorrentía superficial (debidas tanto a un proyecto del sistema inadecuado como a su manejo); las pérdidas por evaporación y

arrastré durante el riego y otras posibles pérdidas producidas durante transporte del agua en las conducciones desde el punto de toma en la parcela hasta su descarga por la unidad de riego (Keller y Bliesner, 1990).

Los sistemas de riego a presión se caracterizan por tener una determinada uniformidad en la aplicación de agua. Los valores de uniformidad bajos pueden afectar al rendimiento y/o calidad de los cultivos y a la eficiencia en el uso de agua, (Warrick y Gardner, 1983; Letey et al., 1984; Montovani et al., 1995; Li, 1998).

La distribución del agua en el riego por aspersión se ve afectada por: las características del aspersor (tamaño, tipo, ángulo y número) (HaiJun, HongZhi e YiChao, 2010 y Dukes y Perry, 2006), la disposición del sistema (separación de aspersores y ramales, la altura del aspersor, velocidad de avance); la distribución de presión en el ramal (Valiantzas y Dercas, 2005) y factores climáticos (velocidad del viento y temperatura) (Dechmi, Playán, Caveró, Faci y Martínez-Cob, 2003).

Las pérdidas de carga en los sistemas a presión incide en el coste de la energía y, entre los métodos de riego por aspersión estas son mayores en el pivote central (Valiantzas y Dercas, 2004 y Valiantzas y Dercas, 2005). Con la simulación hidráulica del ramal pivotante se estima la distribución de presión. El cálculo suele hacerse considerando tanto el supuesto de una distribución de agua continua como el de la distribución discreta y se suelen utilizar la ecuación de pérdidas de carga empírica de Hazen-Williams y/o la general de Darcy-Weisbach.

En este trabajo se han evaluado en campo varios sistemas de los métodos de riego por aspersión: pivote central, cobertura total y ramal de avance frontal, con el fin de proponer criterios que mejoren el manejo del riego. Asimismo, se simula la distribución del agua de las cartas de riego propuestas por el fabricante en varios de los sistemas y se determina la uniformidad de aplicación del agua. Por otra parte se proponen una serie de boquillas que mejoren dicha uniformidad.

2. Materiales y Métodos

Las evaluaciones fueron llevadas a cabo por dos personas siguiendo los protocolos de las normas ISO 11545 e ISO7749-2.

Se evaluaron trece sistemas de diferentes métodos de riego por aspersión: dos de cobertura total (CT), un ramal de avance frontal (RAF) y diez pivotes (PC) de la comunidad de regantes "Río Adaja" sita en Nava de Arévalo (Ávila).

Algunas de las características de los sistemas evaluados se muestran en la Tabla 1.

Sistema	Presión en cabeza (bar)	Longitud (m)
PC 1	3,2	280
PC 2	4,1	183
PC 3	3,5	344,5
PC 4	4	241,9
PC 5	4,4	274,3
PC 6	4,4	207
PC 7	4,5	142,97
PC 8	4,2	231,27
PC 9	4	282
PC10	3,5	199,6
RAF	2,94	17

Tabla 1. Características de los sistemas de riego evaluados.

La evaluación de los sistemas con cobertura total CT1 y CT2 se llevó a cabo con presión en cabeza de 3,14 y 3,2 bar respectivamente.

En la Tabla 2 se muestran los cultivos de cada sistema con la fecha de siembra así como la fecha de la evaluación.

Sistema	Cultivo	Fechas	
		Siembra	Evaluación
PC 1	Maíz	9 de mayo 2011	17 de mayo 2011
PC 2	Maíz	2 de mayo 2011	16 de mayo 2011
PC 3	Maíz	2 de mayo 2011	11 de mayo 2011
PC 4	Remolacha	8 de abril 2011	2 de junio 2011
PC 5	Maíz	22 de abril 2011	18 de mayo 2011
PC 6	Trigo	12 de octubre 2010	4 de mayo 2011
PC 7	Remolacha	26 de marzo 2011	20 de mayo 2011
PC 8	Maíz	25 de abril 2011	10 de mayo 2011
PC 9	Cebolla	6 de marzo 2011	25 de mayo 2011
PC10	Maíz	25 de abril 2011	12 de mayo
CT 1	Remolacha	26 de marzo 2011	24 de mayo 2011
CT 2	Cebolla	6 de marzo 2011	3 de mayo 2011
RAF	Cebolla	28 de febrero 2011	2 de junio 2011

Tabla 2. Cultivos, fechas de siembra y fecha en la que se realizó la evaluación.

En cada evaluación se midió la presión en cabeza con un manómetro diferencial, la velocidad de viento, con un anemómetro, la evaporación sobre la lámina de agua contenida en un vaso pluviométrico y el agua recogida en los pluviómetros dispuestos según la norma correspondiente.

Asimismo, se conocía la fecha de siembra del cultivo y la textura del suelo. Según el proyecto de transformación de riego de la Comunidad de Regantes, el suelo es franco arenoso con una proporción de arena entre 50-70%, de limo entre 0-50% y de arcilla entre 0-20%.

Los resultados de riego considerados fueron:

Rendimiento de aplicación del agua (R_a) expresa la relación entre la lámina neta H_n (agua que aprovecha el sistema radical del cultivo) y la lámina bruta H_b aportada en el riego.

$$R_a = \frac{H_n}{H_b} \quad [1]$$

Coefficiente de déficit (C_d): expresa la relación entre la lamina deficitaria H_d y la lamina requerida para cubrir las necesidades hídricas del cultivo H_r .

$$C_d = \frac{H_d}{H_r} \quad [2]$$

Coefficiente de filtración profunda (C_p): expresa la relación entre la lámina de filtración profunda H_p que no es aprovechada por las raíces y se mueve hacia zonas más profundas respecto de la lámina bruta H_b .

$$C_p = \frac{H_p}{H_b} \quad [3]$$

Las necesidades hídricas del cultivo se han calculado con el programa de la FAO AquaCrop (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) a partir de la precipitación y temperatura medias registradas en la estación climática de Nava de Arévalo.

Se cumple:

$$H_d = H_n - H_r \quad [4]$$

$$H_b = H_n + H_p + H_{ev} \quad [5]$$

Donde: H_{ev} es la lámina evaporada. Suele expresarse por el coeficiente de evaporación (C_{ev}):

$$C_{ev} = \frac{H_{ev}}{H_b} \quad [6]$$

Se cumple:

$$R_a + C_p + C_{ev} = 1 \quad [7]$$

Por otra parte, la determinación de la pluviometría máxima P_{max} en el extremo de un pivote central o ramal de avance frontal es un indicador para conocer la posibilidad de

encharcamiento del suelo en esas condiciones de funcionamiento, que se produciría cuando la P_{max} supera la infiltración del agua en el suelo.

$$P_{max}\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{4}{\pi} \times P_m\left(\frac{mm}{h}\right) \quad [8]$$

$$P_m\left(\frac{mm}{h}\right) = \frac{H_m(mm) \times V\left(\frac{m}{h}\right)}{2 \times r_a(m)} \quad [9]$$

Donde $V(m/h)$ es la velocidad de avance del sistema de riego; r_a es el radio mojado por el emisor en el extremo final, P_m (mm/h) y P_{max} (mm/h) son la pluviometría media y máxima en el extremo respectivamente.

Para el estudio de la distribución del agua de las cartas de riego, proporcionadas por el fabricante primero se ha realizado una simulación hidráulica en hoja de cálculo de la distribución de presiones en los sistemas de los que se dispone la documentación completa (PC1, PC2, PC3, PC4, PC6, PC7, PC8, PC10 y RAF). El cálculo hidráulico se realizó fijando la presión del emisor más alejado, a partir del cual se calculaba la presión del emisor contiguo aguas arriba con la ecuación de la energía [10]. Las pérdidas de carga hf se calcularon para cada tramo comprendido entre dos emisores contiguos con la ecuación de pérdidas de carga de Hazen-Williams [11] donde se utilizó el valor del coeficiente C propuesto por el fabricante.

$$h_{n-1} = h_n + hf + \Delta z \quad [10]$$

Donde h_n y h_{n-1} son las alturas de presión en el emisor n y el emisor aguas arriba n-1 respectivamente.

$$hf_{Hazen-Williams} = \frac{10,679}{C^{1,852}} \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,852} \quad [11]$$

Donde: L es la distancia entre aspersores, Q y D son el caudal y el diámetro del ramal que circula en ese tramo.

El caudal del emisor q se determinó a partir de la ecuación de gasto:

$$q = kp^{0,5} \quad [12]$$

Donde k es el coeficiente en la ecuación de desagüe del aspersor propuesto por el fabricante (3000 series 3TN Nozzle System) y p la presión en el punto de inserción del emisor.

La uniformidad de aplicación del agua por el sistema de riego se expresó mediante el coeficiente de uniformidad de Christiansen CU.

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{\bar{q}} \right) \quad [13]$$

Donde q_i es el caudal desaguado por el emisor i y \bar{q} el caudal medio desaguado por el sistema.

Para mejorar los valores de CU se ha seleccionado las boquillas del fabricante más adecuadas a colocar en la misma posición que las de la carta de riego proporcionada por el fabricante. Para ello, primero se ha determinado la presión de trabajo de cada emisor basándose en el supuesto de distribución continua de caudal a lo largo del ramal, (Tarjuelo, 2005):

$$Q_r = Q_0 * (1 - (r/R)^2) \text{ pivotes centrales} \quad [14]$$

$$Q_r = Q_0 * (1 - r/R) \text{ ramal de avance frontal} \quad [15]$$

Donde: r es la distancia del emisor a la cabeza del sistema y R es el alcance total del agua en el pivote o del ramal de avance frontal que coincide con la longitud total del sistema si no dispone de caño distal.

Conocida la localización de los emisores, el caudal total del sistema y la presión de trabajo en cabeza, se ha calculado la distribución de presiones y de caudales, las pérdidas de carga, y el coeficiente k de la ecuación de gasto del emisor. Con este valor de k se ha elegido las boquillas del fabricante que le correspondería. Como no se dispone de ninguna boquilla comercial con k igual al calculado, se ha seleccionado dos boquillas contiguas: una con un k menor (proporcionaría caudales más pequeños a los de la calculada) y, la otra con un k mayor (proporcionaría mayores caudales a los de la calculada). Posteriormente, se ha determinado la diferencia de caudales entre cada una de estas soluciones y los determinados en el cálculo hidráulico de la distribución continua y se ha propuesto las boquillas que tienen una diferencia menor.

3. Resultados y Discusiones

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las evaluaciones de campo.

Los valores de uniformidad de riego CU varían entre 70 y 89 . Según la clasificación mostrada en Tarjuelo (1995) y en Tarjuelo et al (1992), valores de $CU \geq 80$ son considerado buenos y valores $CU < 80$ se consideran mejorables. Atendiendo a este criterio, la distribución del agua de los pivotes: PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC9, junto con el sistema de cobertura total CT2 y el ramal de avance frontal RAF, es bueno (61,53% de los sistemas evaluados). Por el contrario, son mejorables las distribuciones del agua en el resto de pivotes: PC6 y PC7, PC8 y PC10 y de cobertura total CT1 que en conjunto correspondería al 38,46% de los sistemas evaluados.

Sistema	Hb (mm)	Hm (mm)	Hn (mm)	Hr (mm)	CU (%)	Ra	Cd	Cp	Cev	Pmax (mm/h)
PC 1	5,17	4,12	4,11	5,21	84	0,79	0,21	0	0,20	13
PC 2	5,24	3,94	3,94	9,52	87	0,75	0,58	0	0,25	18,48
PC 3	5,25	3,76	3,76	9,52	81,9	0,71	0,60	0	0,29	12,19
PC 4	6,97	5,57	5,57	14,07	86	0,80	0,60	0	0,20	22,42
PC 5	9,36	7,53	7,49	8,96	89	0,80	0,16	0	0,20	22,43
PC 6	8	7,57	6,67	7,32	79	0,83	0,09	0,11	0,05	9,27
PC 7	4,42	3,81	3,81	11,76	78	0,86	0,67	0	0,14	19,28
PC 8	4,69	3,38	3,35	8,22	70	0,71	0,59	0	0,28	13,41
PC 9	6,20	3,76	3,76	15,37	88	0,61	0,75	0	0,39	13,25
PC10	2,97	1,67	1,67	11,13	79	0,56	0,85	0	0,44	
CT 1	6,95	6,34	6,34	14,74	77	0,91	0,57	0	0,08	
CT 2	4,75	4,57	4,57	14,49	82	0,96	0,58	0	0,04	
RAF	6,93	5,88	5,88	14,35	89	0,85	0,59	0	0,15	13,80

Tabla 3. Resultados de las evaluaciones de campo.

Aunque se considera que las condiciones ambientales pueden haber influido en la evaluación, sobre todo en la evaporación y arrastre de las gotas por el viento, se podría mejorar la uniformidad de aplicación del agua de los sistemas a partir de una mejor selección de la presión en cabeza y a partir de seleccionar y disponer de forma más adecuada los emisores. En el caso del sistema de cobertura total, se propone aplicar la regla de los 2/3, "la distancia en diagonal entre dos aspersores en ramales contiguos no debe exceder los 2/3 del diámetro mojado". De esta forma, el alcance del aspersor X debería ser mayor de $\frac{3}{4}$ de dicha distancia, $X > \frac{3}{4}$ y así se podría mejorar la superposición de las lluvias de los aspersores y por tanto obtener una mejor uniformidad de distribución.

Comparando las tablas 2 y 3 se observa que las H_r calculadas en el cultivo de maíz varía desde 5,21 hasta 11,13 mm. La diferencia podría estar debida al estado

fenológico de las plantas. En los sistemas evaluados está viene marcada por su fecha de siembra (hay 15 días de diferencia máxima entre ellos) y la fecha de evaluación (una semana de diferencia). Por otra parte, la H_r de los cultivos de los sistemas PC8 y PC10 difiere en casi 3 mm habiéndose sembrado el mismo día y evaluado con una diferencia de dos días. Esta diferencia se explica porque en el programa de cálculo de necesidades hídricas el balance se realiza por decenas y, esa diferencia de dos días supone un cambio de una decena a otra. Por otra parte la Tabla 3 muestra la disparidad en lámina bruta aplicada entre los regantes. En los otros sistemas que regaban otros cultivos no se han observado tantas diferencias.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados en el párrafo anterior, se puede analizar los resultados de riego.

El rendimiento de aplicación R_a de los sistemas PC3, PC8 PC9 y PC10 (30,76% de los sistemas evaluados) es menor de 0,75, valor que es considerado como bueno en estos sistemas (INFORIEGO, 2011). Este rendimiento depende, en gran medida, de la lámina de riego requerida H_r para cubrir las necesidades hídricas del cultivo.

Se observa un coeficiente de déficit C_d muy alto en los sistemas PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC7, PC8, PC9, PC10, CT1, CT2 y RAF (el 92% de los sistemas evaluados) indicativo de que se está aplicando un riego deficitario. En los riegos deficitarios se sugiere aumentar el tiempo de aplicación de riego dejando un déficit no más de 0,125, valor que se considera permisible en el riego por aspersión para estos cultivos (Montero et al., 1999) y/o aumentar la frecuencia de riego.

Según Tarjuelo (2005), los suelos franco arenoso tienen un promedio de velocidad de infiltración de 18 mm/h, por lo tanto se considera que hay riego de encharcamiento en el riego de PC2, PC4, PC5 y PC7 que presentan una precipitación máxima en su extremo superior a este valor.

En el Fig. 1 se muestran los coeficiente de uniformidad de Christiansen correspondientes al estudio de la cartas de riego propuestas por el fabricante.

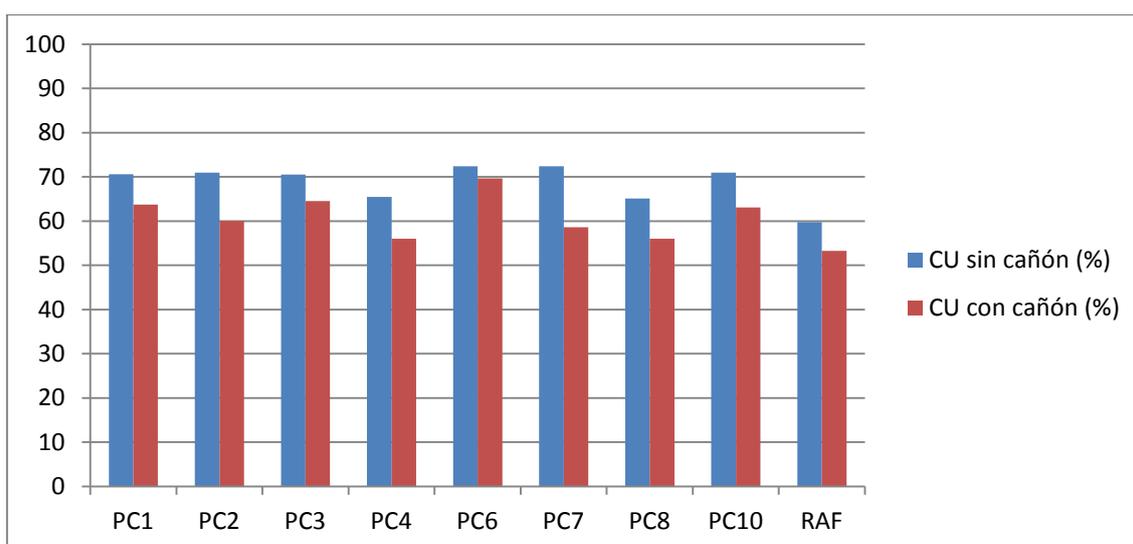


Figura 1. Coeficientes de Uniformidad de Christiansen CU de las cartas de riego propuestas por el fabricante.

En todos los casos, se observa que el cañón disminuye la uniformidad de aplicación del agua del sistema. Por otra parte se observan valores de CU muy por debajo de lo deseado para esos tipos de sistema (80), y más pequeños que los obtenidos en la evaluaciones de campo, por lo que los regantes no deben de regar considerando la carta de riego del fabricante.

En el Fig. 2 se muestran los valores de CU obtenidos con las boquillas seleccionadas atendiendo al supuesto de distribución continua de caudal.

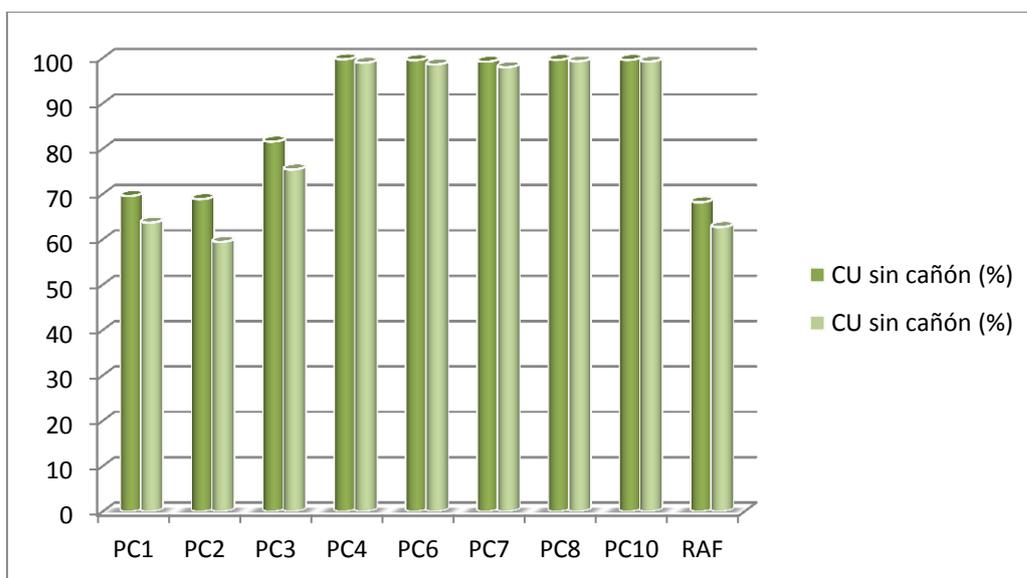


Figura 2. Valores de CU obtenidos con las boquillas seleccionadas atendiendo al supuesto de distribución continua de caudal.

Si se exceptúa los sistemas PC1 y PC2, la selección de las boquillas mejora sensiblemente los valores de CU, por lo que dichas boquillas podrían considerarse como una propuesta para mejorar la uniformidad de aplicación de agua de riego. En los casos PC1 y PC2 quizás se podría mejorar la uniformidad considerando colocaciones de los emisores.

4. Conclusiones

La uniformidad de distribución del agua de riego de los diferentes sistemas de riego evaluados puede considerarse buena aunque podría mejorarse en los sistemas PC6, PC7, PC8, PC10 y CT1 (38% de los sistemas evaluados) seleccionando mejor la presión en cabeza, el solapamiento entre aspersores y evitando el riego con condiciones de viento y temperatura desfavorables. No se ha observado diferencia entre métodos de riego.

Atendiendo a los valores medios de la lámina requerida calculados con la información de toda la serie de datos registrada en la estación meteorológica y la frecuencia de riego proporcionada por los agricultores, el rendimiento de aplicación en casi 31 % de las evaluaciones es menor de 0,75 y puede ser calificado de malo.

Asimismo, el 92% de los sistemas de riego evaluados es deficitario y aportan láminas de agua por debajo de la requerida en toda la superficie por lo que se recomienda aumentar la frecuencia y tiempo de aplicación del riego.

Según las cartas de riego, las boquillas propuestas por el fabricante no son las adecuadas porque no permiten alcanzar un valor de CU deseado para estos sistemas. Por otro lado mediante el estudio de la distribución de caudales bajo el supuesto de distribución continua de caudal, se puede mejorar la uniformidad de aplicación de agua de los sistema escogiendo otras boquillas.

5. Agradecimientos.

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por su apoyo a través del proyecto AGL2008-00153.

6. Bibliografía:

1. Christiansen JE (1942) Irrigation by sprinkling. Bulletin 670. Agricultural experiment station. University of California, Berkeley.
2. Dechmi F. Playa E. Cavero, J. Faci, J.M. Martinez-Cob, A. 2003. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). *Irrig Sci* 22: 67–77
3. Dukes, M. D.; Perry, C. 2006. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems. *Precision Agric* 7: 205-218.
4. HaiJun, Y.; HongZhi, J. e YiChao, Q. 2010. Characterizing center pivot irrigation with fixed spray plate sprinklers. *SCIENCE CHINA technological sciences*. 53 (5) 1398-1405.
5. ISO 11545. Agricultural irrigation equipment-Center-pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles-Determination of uniformity of water distribution.
6. ISO 7749-2. Irrigation equipment-Rotating sprinklers-Part2: Uniformity of distribution and test methods.
7. INFORIEGO. 2011. Agronomía del riego http://www.inforiego.org/opencms/opencms/info_tecnica/6_agronomia/index.html
8. Keller, J. y Bliesner R.D. 1990: Sprinkle and Trickle Irrigation. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York.
9. Letey, J., H. J. Vaux and E. Feinerman. 1984. Optimum crop water application as affected uniformity of water infiltration. *Agronomy Journal* 76: 435-441.
10. Li, J. 1998. Modelling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural Water Management* 38: 135-146.
11. Miliarium.com. 2004. Clasificación textural de los suelos. <http://www.miliarium.com/prontuario/Tablas/Suelos/ClasesTexturales.htm>
12. Montero J., Ortega F.J., Honrubia F.T., Ortiz J., Valiente M., Tarjuelo J.M. 1999. RECOMENDACIONES PARA UN ADECUADO DISEÑO Y MANEJO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN. Congreso del Instituto Internacional de Investigaciones Remolacheras.

13. Montovani, E. C., F. J. Villalobos, F. Orgaz and E. Fereres. 1995. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management* 27: 243-257.
14. Tarjuelo J.M. (1995): *El riego por aspersion y su tecnología*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
15. Tarjuelo J.M. 2005. *El Riego por Aspersion y Su Tecnología*. Ediciones Mundi-Prensa. 219-305.
16. Tarjuelo, J.M., Valiente M. y Lozoya J. 1992. Working conditions of a sprinkler to optimize the application of water. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118(6): 895-913.
17. Valiantzas, J. D., and Dercas, N. (2005). "Hydraulic analysis of the multidiameter center-pivot sprinkler laterals." *J. Irrig. Drain Eng.*, 131(2),137–146.
18. Valiantzas, J. D., y Dercas, N. (2004). "Economic design of centerpivot sprinkler laterals." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 130 (6), 491–498.
19. Warrick, A. W. and W. R. Gardner. 1983. Crop yield Proceeding. California. USA. 439-442. as affected by spatial variation of soil and irrigation. *Water Resources Research* 19: 181-186.