

AUTOPROGRAMADORES PARA COBERTURAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.

Zapata N.¹, Anadón R.², Salvador R.¹, Cavero J.¹, Lecina S.³ y Playán E.¹

1. Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula Dei, CSIC. Apdo 202, 50080 Zaragoza, España. Email: v.zapata@csic.es

2. Técnico del parque Científico Tecnológico de Aula Dei.

3. Departamento de Suelos y Riegos. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Avda Montañana 930. 50059 Zaragoza, España.

1.- Resumen

La aplicación de las nuevas tecnologías al control y automatización de las actividades de riego está adquiriendo gran relevancia en la última década. Mientras que la automatización de la ejecución del riego (a través de los programadores de riego) ya está muy extendida, la generación automática y ejecución de calendarios de riego está recibiendo actualmente gran atención debido a los sistemas de telecontrol instalados en las comunidades de regantes recién modernizadas. En este trabajo se presenta un prototipo de autoprogramador de riego para cobertura total de riego por aspersión. El prototipo consta de un hardware y de un software. El software, llamado Ador-control, está integrado por cinco módulos: Ador-Aspersión, Ador-Cultivo, Ador-Red, Ador-Decisión y Ador-comunicación. Los cuatro primeros módulos simulan las trayectorias de las gotas emitidas por cada aspersor y su distribución en el suelo, el crecimiento del cultivo y su producción y la ordenación del riego de los diferentes hidrantes y sectores que componen la red. El último módulo asegura la comunicación bidireccional entre el software y el hardware. Las variables de decisión, que tienen que ser calibradas para las condiciones técnicas y meteorológicas locales, se basan en índices de productividad del cultivo (índices de calidad del riego y de producción del cultivo). El hardware es un prototipo que traduce las órdenes generadas por el software a órdenes eléctricas de apertura y cierre de válvulas y trasfiere al software información de los sensores locales que controla. Se realizó un experimento de campo para validar el funcionamiento del prototipo de autoprogramador de riego sobre una parcela cultivada de maíz a lo largo de dos campañas de riego. Se realizó un experimento de bloques al azar con cuatro repeticiones para analizar tres tratamientos de riego diferentes: T0) Tratamiento manual simula la programación de un agricultor avanzado.; T1) Tratamiento automático de bajo nivel en el que la programación automática está controlada por un índice simulado de agua disponible en el suelo y otro índice de calidad del riego; T2) Tratamiento automático avanzado, controlado por índices simulados de producción del cultivo y de calidad del riego. Los resultados experimentales de los dos años de ensayos indican que los tratamientos automáticos T1 y T2 resultaron en producciones similares a las obtenidas con el tratamiento manual T0, con ahorros en la cantidad de agua aplicada desde el 10% (entre T0 y T1) hasta el 18% (cuando se compara T0 con T2).

1. - Abstract

The application of new technologies to the control and automation of irrigation processes is becoming very important in the last decade. While the automation of irrigation execution (through irrigation controllers) is now widespread, the automatic generation and execution of irrigation schedules is receiving growing attention. In this paper, a prototype automatic

irrigation controller for solid-set systems is presented. The device is composed by software and hardware developments. The software was named Ador-Control, and it integrates five components: Ador-Sprinkler, Ador-Crop, Ador-Network, Ador-Decision and Ador-Communications. The first four modules simulate drop trajectories emitted by each sprinkler, water distribution in the soil and crop growth and yield, and water allocation to a solid-set field. The last module ensures bidirectional communication between software, hardware and communication networks. Decision variables based on irrigation, soil and crop performance indexes were used to make real-time irrigation decisions. The hardware is a research prototype translating the irrigation schedules into electrical orders (opening or closing solenoid valves) and establishing a path for communication with the software. A field experiment was designed to test and validate the automatic controller over a corn crop during two irrigation seasons. A randomized experimental design with four replicates was used to analyze three treatments: T0) a manual programmer acting as an advanced farmer; T1) automatic scheduling controlled by indexes based on the simulated water content in the soil and irrigation performance; and T2) advanced automatic scheduling controlled by simulated thresholds of crop and irrigation performance indexes. Experimental results in 2009 and 2010 indicated that automatic irrigation treatments resulted in similar maize yield than manual scheduling. Automatic irrigation used significantly less water than manual irrigation (10% between T0 and T1, and 18% between T0 and T2). Differences in water productivity were very relevant.

2.- Introducción, Objetivos.

La agricultura española ha evolucionado muy rápidamente en los últimos 20 años. En el área del regadío hemos pasado de regar a pie a dar órdenes al programador de nuestra finca. Si nuestra comunidad de regantes dispone de un moderno sistema de telecontrol, se pueden realizar las operaciones de riego de forma remota, desde un ordenador de la comunidad de regantes. A pesar de ello, todavía es importante la intervención del agricultor en las tareas de programación de riego: qué parcela queremos regar, cuándo la queremos regar, cuánto tiempo la queremos regar y si la hemos regado de verdad. El tiempo que los regantes dedican a estas actividades todavía es importante.

Con el objetivo de facilitar la tarea de programar adecuadamente los riegos y reducir el tiempo dedicado a estas actividades en sistemas de aspersión en cobertura total, se ha diseñado un autoprogramador de riego en parcela. El autoprogramador incluye un software que tiene por objetivos últimos optimizar la producción y el uso del agua, gestionar el riego de los diferentes sectores que conforman la red parcelaria, gestionar los hidrantes compartidos y acomodar las restricciones derivadas de cupos de agua y costes energéticos.

3.- Materiales y Métodos

El autoprogramador de riego es un resultado de los más de 20 años que el grupo de Riego Agronomía y Medio Ambiente (RAMA) de Aragón ha dedicado a investigar el riego por aspersión en cobertura total. Los trabajos científicos de Dechmi y col., 2004a y 2004b; Playán y col., 2005, 2006, 2007; Zapata y col., 2007, 2009, han sido los precursores de este desarrollo.

Los avances científico-técnicos del autoprogramador de riego se han desarrollado mediante un prototipo que se ha ensayado en campo. El prototipo se diseñó desde un punto de vista científico y hasta el momento no ha tenido un desarrollo empresarial/comercial. El autoprogramador está compuesto por dos partes principales:

1. El software. Es un programa informático llamado Ador-Control que incluye un modelo de simulación de crecimiento del cultivo y de balance hídrico en el suelo (Ador-Crop), un modelo de simulación de riego por aspersión que reproduce la variabilidad del reparto

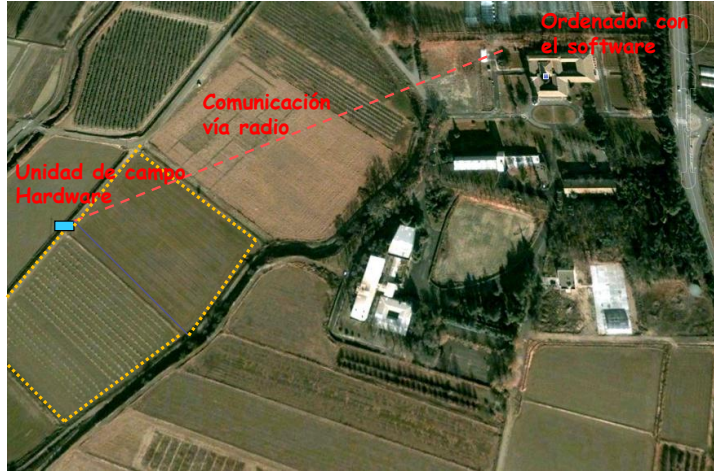


Figura 1. Vista aérea de la parcela de ensayos y la unidad remota.

de agua de una cobertura total bajo diferentes condiciones hidráulicas y meteorológicas (Ador-Aspersión), un modelo de gestión de la red parcelaria, que controla desde el hidrante hasta el sector (Ador-Red), un módulo de decisión (Ador-Decisión) y un

módulo de comunicaciones entre el software y el hardware (Ador-Comunicación). El objetivo de Ador-Control es elaborar los calendarios de riego de forma dinámica, en función de la meteorología, del desarrollo del cultivo, de la disponibilidad de agua en el suelo y del estado de la red de riego. El software se instaló en un ordenador remoto localizado en el centro de investigación que se comunica vía radio con el hardware de campo (Figura 1).

2. El hardware. Es el equipo de campo que recibe las órdenes de riego del software y las ejecuta. Además, está compuesto por una serie de sensores locales, técnicos (lectura de caudal, lectura de presión) y meteorológicos (velocidad y dirección del viento, humedad relativa) que informan al software cuando éste lo requiere.

El calendario elaborado por el software se transmite vía radio al hardware de campo. Éste a su vez transforma las señales de radio en señales eléctricas que actúan sobre solenoides que ejecutan la apertura y cierre de las válvulas hidráulicas.

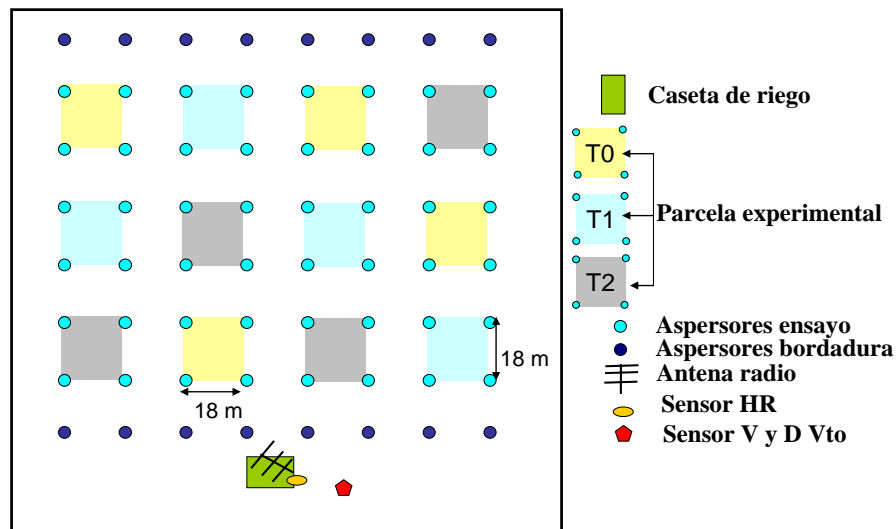


Figura 2. Esquema del diseño experimental donde se presentan el sector 0 (S0) de cada uno de los tres tratamientos de riego con sus cuatro repeticiones.

Los sensores hidráulicos locales instalados en la red de riego permiten supervisar que las órdenes generadas por el software se reciben en el equipo de campo y se ejecutan de forma correcta. La supervisión se realiza mediante unos protocolos, que en caso de anomalías, desencadenan alarmas en forma de mensajes GSM al móvil o al correo electrónico. De esta forma, ante cualquier problema el agricultor (en este caso los investigadores) reciben un mensaje de texto que informa de si tal o cual válvula no ha abierto o no ha cerrado, o de si ha habido una caída de la presión en la red o un caudal de servicio fuera del rango esperado.

El prototipo Ador-Control gestionó el riego de tres parcelas de seis sectores cada una, durante dos campañas de riego (2009 y 2010) de un cultivo de maíz. Cada parcela se regó con programaciones de riego diferentes, lo que llamaremos tratamientos de riego. A continuación se describen los tres tratamientos ensayados:

1. Tratamiento 0 (T0). Corresponde a una programación de riego manual en el que un buen agricultor consulta las necesidades de riego de los cultivos y semanalmente programa su riego.
2. Tratamiento 1 (T1). Autoprogramación estándar. Programación realizada y ejecutada por el software sin intervención del agricultor. Se establece una cantidad mínima de agua en el suelo (variable déficit permisible de agua en el suelo) que cuando se supera se levanta la bandera del riego. El riego se ejecuta o no en función de las características ambientales del momento.
3. Tratamiento 2 (T2). Autoprogramación avanzada. Se establecen unos parámetros de productividad del cultivo que se basan en el establecimiento de un mínimo de calidad de riego y de producción del cultivo.

La parcela de campo solo incluyó uno de los sectores de cada uno de los tratamientos de riego ensayados, que llamaremos sector 0 (S0). Es decir, aunque el autoprogramador simula y gestiona el tiempo de riego de los seis sectores de cada una de las tres parcelas, realmente, en campo, sólo estaba representado el sector S0 de cada tratamiento, mientras que los otros cinco eran sectores virtuales. La señal vía radio de apertura y cierre de válvulas sólo se producía cuando correspondía regar el S0 de alguno de los tratamientos. En campo, el sector S0 de cada tratamiento estaba repetido cuatro veces (cuatro parcelas experimentales cada una de una superficie correspondiente a un marco de aspersión de 18x18 m) que se distribuyeron al azar. La Figura 2 presenta la distribución de los tres tratamientos de riego con cuatro repeticiones, un total de 12 parcelas experimentales. La parcela estaba equipada con una cobertura fija de aspersión en un marco rectangular de 18 x 18 m, con aspersores de giro completo y de doble boquilla (4,4 mm y 2,4 mm) colocados a una altura de 2,3 m sobre el terreno. Las características técnicas del sistema y la disposición de los aspersores arrojaron una precipitación bruta de 5,29 mm h⁻¹.

El maíz variedad Pioneer PR34N43 (ciclo FAO 600) se sembró el 21 de abril de 2009 y el 20 de abril de 2010. Se aplicaron los tratamientos fitosanitarios pertinentes, iguales para los tres tratamientos a lo largo de las dos campañas de riego. Los fertilizantes se aplicaron mediante dos fertirriegos en los estadíos de seis (V6) y doce (V12) hojas.

4.- Resultados y Discusión

En la campaña 2009, desde la siembra hasta su recolección el 20 de octubre, se aplicaron 163, 140 y 133 horas de riego a los tratamientos T0, T1 y T2, respectivamente. Durante esta campaña la evapotranspiración del cultivo ascendió a 695 mm y la lluvia fue de 69 mm. En la campaña 2010, desde la siembra hasta la cosecha el 18 de octubre, la evapotranspiración del cultivo ascendió a 698 mm y la pluviometría fue de 135 mm. Durante esta campaña se aplicaron 135, 131 y 119 horas de riego a los tratamientos T0, T1 y T2, respectivamente.

La meteorología de las campañas de riego fue muy diferente. Mientras que la campaña de riego 2009 resultó ser poco ventosa (velocidad media del viento de 2 m s⁻¹), la campaña 2010 fue representativa de una campaña de riego media (velocidad del viento media de 2,4 m s⁻¹). La campaña 2009 fue muy seca, y la 2010 se caracterizó por presentar una precipitación cercana a una campaña media. También la temperatura máxima superó a la media en 1,5 °C en la campaña 2009, siendo la de 2010 similar a la de la campaña media. La Tabla 1 presenta las condiciones meteorológicas medias en las que se desarrollaron los riegos en cada tratamiento y campaña de riego, así como la calidad media de dichos riegos. En general, las condiciones meteorológicas medias de los riegos fueron muy similares entre tratamientos. Sin embargo, los tratamientos completamente automáticos T1 y T2 regaron en condiciones de viento ligeramente mejores y con menor variabilidad que el tratamiento manual (T0) en ambas campañas de riego (ver los valores del coeficiente de variación de la

velocidad del viento en la Tabla 1). Esto indica que los tratamientos automáticos son más eficientes a la hora de buscar los momentos más adecuados para el riego, superando a una buena programación manual.

Tabla 1. Resumen de las condiciones meteorológicas medias de los riegos aplicados al cultivo de maíz a lo largo de las dos campañas de riego (2009 y 2010) para cada uno de los tratamientos ensayados (T0, T1 y T2), así como la calidad media de los mismos expresadas en términos de Coeficiente de Uniformidad (CU, %), Eficiencia de aplicación del riego (EA, %) y Eficiencia en el uso del agua (kg m^{-3}).

Campaña riego	Trat.	Vvto* (m s^{-1})	HR* (%)	CU (%)	EA (%)	Eric. Uso Agua (kg m^{-3})
2009	T0	1,1 (64)	60 (37)	84	76	1,9
	T1	0,9 (56)	62 (31)	84	81	2,1
	T2	1,0 (40)	61 (30)	84	85	2,2
2010	T0	1,4 (86)	68 (32)	84	81	2,3
	T1	1,2 (58)	67 (30)	85	87	2,3
	T2	1,3 (62)	67 (30)	84	86	2,5

La uniformidad estacional de los riegos no resultó muy diferente entre tratamientos e incluso entre campañas de riego. Sin embargo, la variabilidad de este parámetro de calidad del riego fue mayor en los tratamientos manuales (CV del 8% en T0) que en los tratamientos completamente automáticos (CV aproximado del 4% en T1 y T2). La mayor variabilidad en el tratamiento manual indica que los tratamientos automáticos son más eficientes y constantes en la búsqueda de condiciones adecuadas para el riego. A lo largo del ciclo del maíz el número de riegos que se aplican es importante (en nuestro caso aproximadamente 30 riegos) y el que dos o tres riegos aplicados se realicen en condiciones ambientales poco favorables no se ve reflejado en el parámetro de uniformidad del riego (Tabla 1), ya que hay un efecto compensatorio con el resto de riegos que se realizan en condiciones adecuadas. Sin embargo, el parámetro eficiencia de riego (EA), que es el ratio entre agua utilizada por el cultivo frente a la aplicada con el riego, sí que se ve muy afectada por estos riegos de baja calidad tal y como muestran los resultados de la Tabla 1.

La diferencia más importante entre tratamientos se encontró en la eficiencia de aplicación del riego, siendo de hasta 9 puntos porcentuales superior en el tratamiento automático más avanzado, T2, frente al T0 en la campaña 2009. En la campaña 2010, las diferencias entre programación manual y automática alcanzaron los 6 puntos porcentuales.

La Figura 3 presenta cómo se realizó la cosecha mecanizada en el experimento. Primero se cosecharon los pasillos que separan los diferentes tratamientos con sus repeticiones dejando individualizadas las 12 subparcelas experimentales (Figura 3a). Posteriormente se realizó la cosecha individualizada de cada una de las subparcelas experimentales (Figura 3b), que se pesó en campo en un remolque pesador (Figura 3c). Se tomó una muestra de grano para caracterizar su humedad.



Figura 3. Fotos del proceso de cosecha mecánica del maíz: Vista general de la cosecha (3a), cosechando una subparcela experimental (3b) y pesando el grano cosechado de cada subparcela en un remolque pesador (3c).

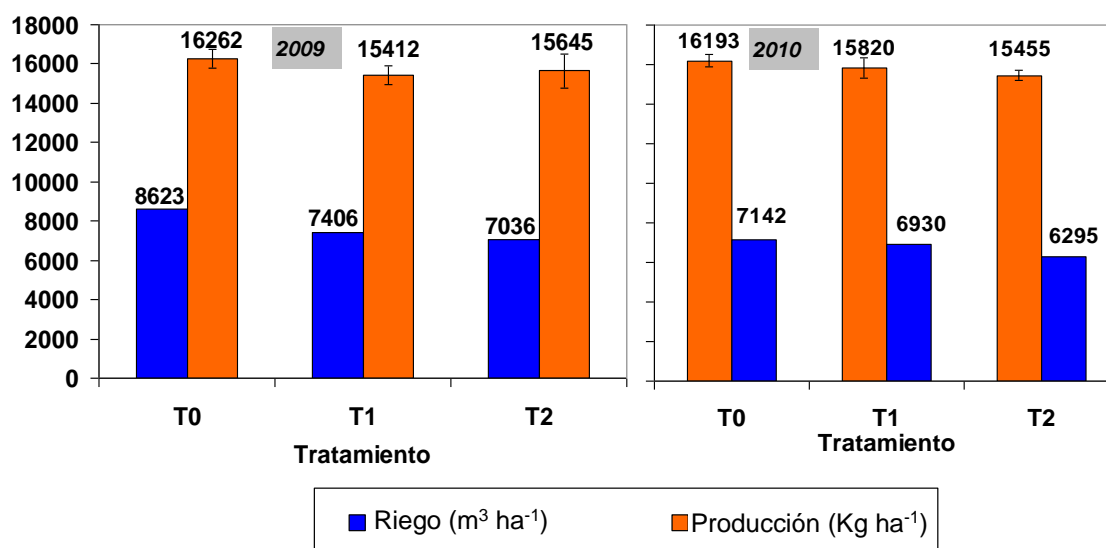


Figura 4. Volumen de riego ($m^3 ha^{-1}$) y producción en grano al 14% de humedad ($kg ha^{-1}$) en cada una de las programaciones de riego (T0, T1 y T2) en las campañas de riego 2009 (figura izquierda) y 2010 (figura derecha).

La Figura 4 presenta los volúmenes de riego aplicados en $m^3 ha^{-1}$ y la producción en grano expresada a una humedad del 14% en $kg ha^{-1}$ para cada uno de los tres tratamientos de riego. Las barras verticales de la producción en grano representan la variabilidad de la

producción, correspondiente a las cuatro repeticiones de cada tratamiento. En la campaña de riego 2009 el tratamiento T1 aplicó un 14% menos de agua que el T0, y el T2 aplicó hasta un 18% menos que el T0. En la campaña de riego 2010 los volúmenes de riego medios fueron inferiores y el tratamiento automático T1 aplicó un 3% menos de agua que el tratamiento manual y el T2 un 12% menos que el manual. En cuanto a las producciones, no hubo diferencias significativas en la producción en grano al 14% de humedad entre tratamientos en ninguno de los dos años. Con los tratamientos de riego automáticos se consiguió reducir el volumen de agua aplicado al cultivo desde un 10% (con un tratamiento automático sencillo, T1) hasta un 18% (automático avanzado, T2) frente al que aplica un buen agricultor sin que la diferencia en la producción resultara estadísticamente significativa.

5.- Conclusiones

1. El prototipo de programador automático ha funcionado de forma autónoma durante los dos años de prueba en campo y ha reducido a la mínima expresión el tiempo y los conocimientos que el agricultor debe dedicar a la tarea de programar y ejecutar el riego.
2. Las programaciones automáticas (T1 y T2) ensayadas con el autoprogramador permitieron obtener la misma producción de maíz con menos agua de riego.
3. La programación automática sencilla, T1, consiguió reducir en torno a un 9% el agua de riego (y de todos los gastos derivados de su aplicación) respecto a la que se aplica con una buena programación manual, sin que la producción se viera resentida.
4. La programación automática avanzada, T2, consiguió reducir hasta un 15% el agua de riego aplicada, sin diferencias estadísticas en la producción.

6.-Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con la ayuda financiera del Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto AGL2010-21681. Agradecemos la colaboración del personal del CITA-DGA, Miguel Izquierdo, Jesús Gaudó y Juan Manuel Acín por su ayuda en las tareas de campo.

7.- Referencias

- Dechmi, F., E. Playán, Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J. M. (2004a). "Coupled crop and solid set sprinkler simulation model. I: Model development." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 130(6): 499-510.
- Dechmi, F., E. Playán, Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J. M (2004b). "Coupled crop and solid set sprinkler simulation model. II: Model application." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 130(6): 511-519.
- Playán, E., R. Salvador, Faci, J. M., Zapata, N., Martínez-Cob, A., Sanchez, I. (2005). "Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals." *Agricultural Water Management* 76(3): 139-159.
- Playán, E., N. Zapata, Faci, J. M., Tolosa, D., Lacueva, J. L., Pelegrín, J., Salvador, R., Sánchez, I, Lafita, A. (2006). "Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model." *Agricultural Water Management* 84(1-2): 89-100.
- Playán, E., J. Cavero, Mantero, I., Salvador, R., Lecina, S., Faci, J. M., Andrés, J., Salvador, V., Cardena, G., Ramon, S., Lacueva, J. L., Tejero, M., Ferri, J., Martínez-Cob, A. (2007). "A database program for enhancing irrigation district management in the Ebro Valley (Spain)." *Agricultural Water Management* 87(2): 209-216.
- Zapata, N., E. Playán, et al. (2007). "From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas." *Agricultural Water Management* 87(2): 187-199.

Zapata, N., E. Playán, et al. (2009). "Simulation of a Collective Solid-Set Sprinkler Irrigation Controller for Optimum Water Productivity." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 135(1): 13-24.