

VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SORGO Y DEL AGUA APLICADA EN UNA COBERTURA FIJA DE RIEGO POR ASPERSIÓN

M.J. BERENGUER

J.M. FACI

Unidad de Suelos y Riegos (SIA)
Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)
Apartado 727. 50080 Zaragoza

A. MARTINEZ

Dpto. de Genética y Producción Vegetal.
Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)
Apartado 202. 50080 Zaragoza

RESUMEN

El riego por aspersión, incluso en condiciones de buen manejo, lleva asociado un cierto grado de variabilidad que se refleja en una falta de uniformidad en la cantidad de agua infiltrada que puede afectar a la producción final de los cultivos.

En este trabajo se evaluó la variabilidad asociada al riego por aspersión en cuanto al agua aplicada en riego, agua almacenada en el suelo, fracción de lavado y rendimientos del sorgo y sus componentes en un ensayo de campo realizado en una cobertura fija de aspersión de los nuevos regadíos de Monegros II (Huesca).

El volumen total de agua aplicada en la campaña de riegos fue el equivalente a una lámina media de 745 mm con un coeficiente de variación (CV) del 7,5 p. 100. El CV del agua acumulada en el suelo en el momento de la cosecha fue solamente un 5,1 p. 100. Sin embargo, el CV del rendimiento en grano y de la producción de materia seca aérea fue del 18,7 p. 100 y 23,7 p. 100, respectivamente. Los resultados de este trabajo mostraron que las variaciones registradas en el agua aplicada en riego no fueron la causa principal de la mayor variabilidad obtenida en el rendimiento del sorgo y sus componentes. Estas fueron debidas fundamentalmente a la variabilidad en la contribución de los tallos y panículas axilares a la producción final del sorgo.

PALABRAS CLAVE: Riego
Aspersión
Variabilidad
Redistribución
Rendimiento
Uniformidad
Sorgo

Recibido: 13-11-96

Aceptado para su publicación: 5-3-97

Redactor asociado: J. Berengena

INTRODUCCION

El riego por aspersión, aun en sistemas bien diseñados y con un manejo óptimo, lleva asociado un cierto grado de variabilidad en la aplicación del agua que se traduce en diferentes volúmenes de agua infiltrada en distintos puntos de la superficie regada (Stern, Bresler, 1983; Warrick *et al.*, 1989). Sin embargo, debido a los procesos de redistribución del agua en el suelo, la variabilidad de su humedad suele ser menor que la del agua de riego aplicada (Hart, 1972).

Normalmente, la solución al problema de la falta de uniformidad del riego cuando hay un suministro suficiente de agua, suele ser la aplicación de una cantidad de agua mayor que las necesidades hídricas medias del cultivo implantado, de forma que toda la zona regada reciba una cantidad igual o superior a dichas necesidades. Esta solución puede ocasionar problemas derivados del riego excesivo tales como el encharcamiento, la escorrentía y erosión del suelo y el lavado de los nutrientes. Por el contrario, un riego menor haría que partes de la parcela estuvieran insuficientemente regadas, conduciendo a zonas con déficit hídrico y al consiguiente descenso del rendimiento del cultivo (Clemmens, 1991).

Uno de los parámetros más utilizados para describir la uniformidad del riego por aspersión es el coeficiente de uniformidad (CU) de Christiansen (1942), que viene definido por la expresión siguiente:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |d_i|}{M n} \right) \quad [1]$$

donde:

M = altura media de agua recogida en los pluviómetros, mm

d_i = diferencia entre la altura de agua recogida en el pluviómetro i y la altura media de agua recogida en los n pluviómetros, mm

n = número de pluviómetros

La uniformidad del riego por aspersión también se describe frecuentemente mediante otro parámetro, la uniformidad de distribución (UD) referida a la altura media de agua recogida en el 25 p. 100 menos regado respecto a la altura media de agua de recogida en el área total regada (Merriam, Keller, 1978) y que se define por la siguiente expresión:

$$UD = 100 \frac{M_{25}}{M} \quad [2]$$

donde:

M_{25} = altura media de agua recogida en el 25 p. 100 menos regado del área total regada

M = altura media de agua recogida en la parcela

Por otro lado, la variabilidad en el rendimiento de un cultivo se debe a muchos factores de tipo agronómico, ambiental y genético. Normalmente, los factores agronómicos más importantes que determinan esta variabilidad son la heterogeneidad de las características del suelo y las diferencias en el agua infiltrada en el suelo a lo largo de la campaña de riegos (Stern, Bresler, 1983; Hunsaker, Bucks, 1987; Warrick, Yates, 1987). Diversos autores

han encontrado que en condiciones de homogeneidad del suelo, el factor que más afecta al rendimiento y sus componentes es la variabilidad del agua aplicada (Stern, Bresler, 1983; Warrick, Gardner, 1983; Solomon, 1984). El conocimiento de la influencia de la falta de uniformidad sobre la producción de los cultivos es importante para el diseño, manejo y evaluación económica del sistema de riego.

Las relaciones existentes entre el rendimiento de los cultivos y la cantidad y uniformidad del agua de riego, así como estrategias de su aplicación y costes óptimos de riego se han estudiado principalmente mediante modelos (Warrick, Gardner, 1983; Letey, 1985; Letey *et al.*, 1990; Warrick, Yates, 1987; Mantovani, 1993; Tarjuelo, 1985) y con trabajos experimentales de campo (Stern, Bresler, 1983; Hunsabaker, Bucks, 1987; Or, Hanks, 1992; Mateos *et al.*, 1994). En muchos de estos trabajos existía originalmente una variabilidad considerable en los volúmenes de agua aplicada en riego, e incluso en algunos casos esta variabilidad se creaba de forma artificial. Así, Mateos *et al.* (1994) en un trabajo de campo compararon el efecto de dos niveles de uniformidad (CU del 90 p. 100 y del 70 p. 100) combinado con el efecto de dos cantidades de agua (400 y 260 mm) en un cultivo de algodón. Estos autores encontraron que el rendimiento final no se vio afectado por el nivel de uniformidad ni por la cantidad de agua aplicada. Esto fue debido a que la redistribución del agua en el suelo pudo inducir un CU efectivo superior al de la aplicación del agua y a que la profundidad del suelo y la presencia de agua en capas inferiores del perfil probablemente permitieron el desarrollo profundo de raíces. No obstante, la falta de uniformidad del riego causó más variabilidad en la maduración de las cápsulas.

El objetivo de este trabajo fue la caracterización de la variabilidad del agua aplicada en el riego, del agua almacenada en el suelo y del rendimiento del sorgo y sus componentes en un sistema fijo de riego por aspersión, bien diseñado y manejado, situado en los nuevos regadíos de Monegros II (Huesca).

MATERIAL Y METODOS

El experimento se realizó en el año 1991 en un sector de riego por aspersión de 0,36 ha situado en la finca experimental de riegos de Valfarta (Monegros II, Huesca) de la Diputación General de Aragón. Las coordenadas UTM de esta finca experimental referidas al MTN E 1:50.000 son: 30TYM390047; Z = 340 m.

El sector de riego constaba de 16 aspersores instalados a un marco rectangular de 15 m x 15 m. El aspersor utilizado fue el modelo RC Farm 140/170 provisto de dos boquillas de 4,4 mm y 2,4 mm de diámetro. En el área comprendida entre los cuatro aspersores centrales se instalaron 25 pluviómetros a un marco rectangular de 3 m x 3 m (Fig. 1), mediante los cuales se determinó el agua aplicada en cada riego. Los pluviómetros se situaron inicialmente sobre soportes a 0,80 m del suelo y se fueron elevando hasta una altura de 1,70 m, a medida que aumentó el desarrollo del cultivo para evitar la intercepción del agua por la cubierta vegetal.

Asimismo, durante cada riego se midió la velocidad media del viento con un anemómetro situado a 2 m de altura en la estación agrometeorológica adyacente a la parcela experimental.

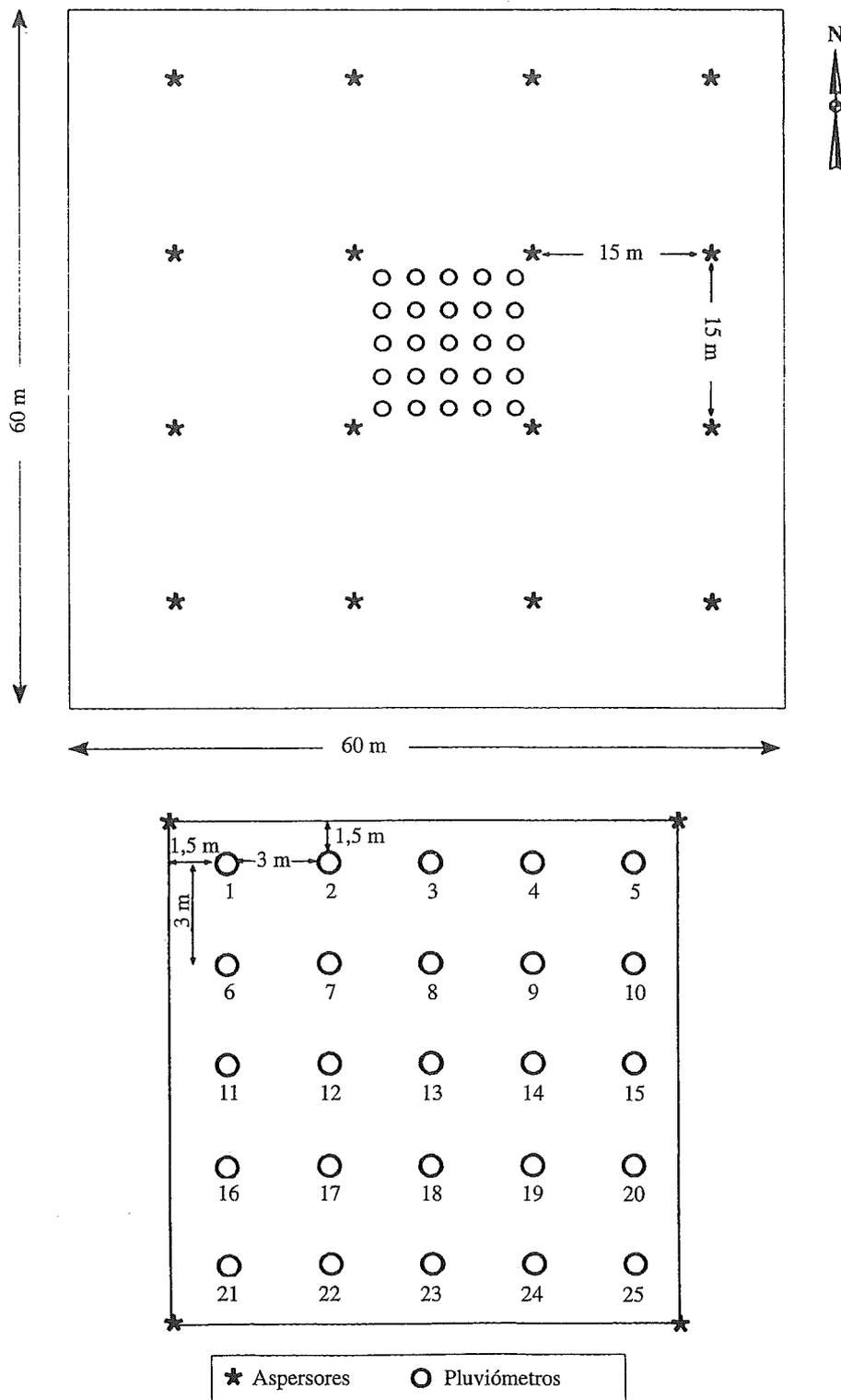


Fig. 1.-Esquema de los 25 pluviómetros situados entre los cuatro aspersores centrales de la parcela experimental. En la parte inferior se presenta el detalle de la instalación de los pluviómetros
Schematic diagram of the 25 pluviometers located between the four central sprinklers of the experimental plot. A detailed scheme of the pluviometers is presented in the lower part

La siembra del sorgo (*Sorghum bicolor*. L. Moench, cultivar P-8501) se realizó el 24 de mayo (día 0 después de la siembra, 0 DDS) con sembradora de cereales en líneas Norte-Sur separadas 0,36 m. Posteriormente, cuando la nacencia del sorgo fue completa, se realizó un aclareo de plantas dejando una población homogénea de 30 plantas/m² en toda la superficie de trabajo. El 23 de mayo se aplicaron 800 kg/ha de abono complejo 8-24-8. El 30 de julio se abonó en cobertera con 500 kg/ha de urea del 46 p. 100 de riqueza.

La caracterización climática se realizó utilizando los datos medios mensuales del año 1991 y del año medio. Estos datos procedían de las observaciones realizadas en la estación meteorológica situada en la misma finca experimental, que fue instalada en 1986. De esta manera, se estableció un calendario de dos riegos por semana, de forma que la cantidad de agua aplicada fuese similar a las necesidades hídricas del sorgo (ET_{sorgo}) a lo largo de su ciclo de cultivo. La ET_{sorgo} se determinó a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0), calculada con los datos meteorológicos registrados en la estación agrometeorológica mediante el método de Blaney-Criddle modificado por FAO, y de los coeficientes de cultivo tabulados por la FAO (Doorenbos, Pruitt, 1977). Los coeficientes de cultivo se ajustaron en función de la duración de los distintos estadios del cultivo en la propia zona de estudio.

Las lluvias estuvieron desigualmente repartidas a lo largo del desarrollo del experimento, siendo más abundantes hacia el final del mismo, en los meses de septiembre (44,4 mm) y octubre (23,8 mm). Asimismo, es de destacar que en el mes de julio esta pluviometría no superó 1 mm. La pluviometría estacional durante el ciclo del cultivo (del 24 de mayo al 23 de octubre) ascendió a 89,9 mm. La pluviometría media anual fue de 339,0 mm.

En cuanto a la caracterización edáfica, la parcela experimental se encontraba situada sobre una llanura de limolitas y calizas, con una pendiente inferior al 2 p. 100. El suelo se clasifica (Soil Survey Staff, 1975, 1994) como Typic Torriorthent (Artieda, com. pers.). El suelo de la parcela es de textura franco-limosa, de unos 60 cm de profundidad, con estructura de poco a moderado desarrollo y con escasos elementos gruesos de naturaleza caliza en la superficie.

La conductividad eléctrica del extracto saturado de la capa superficial (0-30 cm) del suelo es de 7,2 dS/m, siendo el calcio el ion mayoritario (Tabla 1). El contenido de yeso original de la capa superficial se determinó cualitativamente (Porta *et al.*, 1986), resultando menor al 1 p. 100. La conductividad eléctrica del agua del riego fue de 0,45 dS/m y su relación de adsorción de sodio (RAS) de 0,44 (meq/l)^{0,5}. Se realizó un test de dispersión de arcillas para conocer el valor de floculación del suelo de la parcela (Aragüés, Amézqueta, 1991) cuyo valor fue de 0,22 dS/m.

Estos valores indican que no sería de esperar una dispersión química del suelo con estas aguas de riego que pudiera afectar a la infiltración del agua en el suelo, tal como se comprobó en un trabajo realizado en una parcela adyacente a ésta (Berenguer *et al.*, 1994). Estos autores estudiaron el efecto del riego por aspersión sobre la infiltración del suelo con diversas coberturas (cultivo de sorgo, arena, yeso y desnudo) concluyendo que, además de no existir dispersión química, el efecto de la dispersión física del suelo provocada por el riego por aspersión en este suelo desnudo fue minimizada por la presencia del cultivo de sorgo, sobre todo a partir del momento en el que el cultivo alcanzó una cobertura casi total del suelo. Así, los tratamientos con cultivo de sorgo mantuvieron una tasa de infiltración similar a la pluviometría (8,7 mm/h), mientras que en los tratamientos sin cobertura, es decir, con suelo desnudo, hubo un importante descenso de la misma, situándose entre 4,3 y 5,8 mm/h. Estos resultados indican que en este experimento no cabría esperar un encostramiento del suelo debido a una dispersión de la superficie del suelo por causas físicas o químicas que pudiera afectar a la infiltración del agua de riego y por tanto al rendimiento del cultivo.

TABLA 1

**ANÁLISIS TEXTURAL Y PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS
DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL SUELO DE LA PARCELA
EXPERIMENTAL (0 a 30 cm)**

Textural analysis and physico-chemical characteristics of the soil surface layer (0 to 30 cm depth) of the experimental plot

GRANULOMETRÍA (%)				HUMEDAD (%)				
Arena	Limo grueso	Limo fino	Arcilla	1/3 at	15 at			
25,9	14,7	29,1	30,2	23,6	10,8			
EXTRACTO DE PASTA SATURADA								
CE (dS/m)	SAT (%)	RAS (meq/l) ^{1/2}	Ca (meq/l)	Mg (meq/l)	Na (meq/l)	Cat. cambio (meq/100 g)	M.O. (%)	CaCO ₃ (%)
7,18	38,5	3,4	60,4	12,6	21,0	12,1	1,5	39,9

La altura del cultivo se midió como la distancia desde el suelo hasta el ápice de la hoja superior extendida, excepto en el caso de que la panícula sobrepasara a éste, en cuyo caso se midió hasta el extremo final de la panícula. Así, la evolución de la altura del cultivo se realizó en 75 plantas previamente etiquetadas, tres junto a cada pluviómetro, en siete fechas a lo largo del desarrollo del cultivo, hasta que éste alcanzó la altura máxima. Además, se determinó la evolución del porcentaje de suelo sombreado en 25 miniparcels de 1 m² de superficie situadas junto a los pluviómetros en cuatro fechas mediante la técnica no destructiva de la medida de longitud de regla sombreada (Adams *et al.*, 1976; Coscolluela, Faci, 1992). Esta técnica consistió en colocar una regla de 1,0 m de longitud paralela a las líneas de cultivo y contar la distancia de regla sombreada a intervalos de 0,05 m entre dos líneas adyacentes de sorgo.

Así, el porcentaje de suelo sombreado (SS) se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$SS = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{L n} \times 100 \quad [3]$$

donde:

r_i = Longitud de regla sombreada en la posición i (cm)

L = Longitud total de la regla utilizada (cm)

n = Número de posiciones de la regla entre dos líneas de cultivo

Las medidas del porcentaje de suelo sombreado se realizaron en días soleados y a mediodía solar para evitar el efecto del ángulo de incidencia de los rayos solares.

Una vez alcanzada la madurez fisiológica, detectable por una mancha negra que aparece en la base del grano maduro (Martin *et al.*, 1976), a partir de la cual la translocación de nutrientes al grano es despreciable (Eastin *et al.*, 1973), se procedió al cosechado del cultivo. Así, el 23 de octubre (153 DDS) en el área adyacente a cada pluviómetro se cosechó la parte aérea de las plantas de sorgo en miniparcelas de 1 m² (tres líneas de 0,93 m de longitud, separadas 0,36 m).

En cada miniparcela se contó el número de plantas y de panículas, tanto las correspondientes al tallo principal como las axilares. Panículas, tallos y hojas se secaron en estufa a 60° C hasta peso constante. Asimismo, se calculó el índice de cosecha (IC) y el peso de mil granos. El IC se calculó como la relación entre la producción de grano seco y la materia seca total. El peso de mil granos se determinó utilizando un contador electrónico de semillas modelo Numigral (Tripette et Renaud, París, Francia) pesándolos a continuación en una balanza de precisión.

El 23 de octubre (153 DDS), se determinó en cada miniparcela la variabilidad espacial de la humedad del suelo, para lo cual se midió el contenido de agua entre 0 y 60 cm de profundidad por gravimetría. Asimismo, al inicio del ensayo se tomaron muestras de suelo a intervalos de 30 cm en ocho puntos de la misma para determinar la humedad inicial de la parcela.

La percolación se determinó mediante balance hídrico en las 25 miniparcelas adyacentes a los pluviómetros. La fracción de lavado se estimó como la relación entre la percolación y el total de agua aportada a la superficie del suelo. Para calcular dichos valores se consideraron la pluviometría estacional (89,9 mm) y el agua aplicada en todos los riegos practicados, incluyendo los ocho riegos no evaluados (233,5 mm).

Finalmente, se elaboraron mapas de isolíneas de diversas variables mediante el programa informático SURFER v. 6.0 (Golden Software, Inc, Golden, Colorado), utilizando como método de interpolación la inversa del cuadrado de la distancia (Isaaks, Srivastava, 1989).

RESULTADOS Y DISCUSION

Agua aplicada y uniformidad del riego (CU, UD, CV) en cada riego y en el riego acumulado a lo largo del desarrollo del cultivo

La Tabla 2 presenta la fecha, duración, pluviometría media (mm/h), altura del agua aplicada (mm), coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) (Christiansen, 1942), uniformidad de distribución (UD) (Merriam, Keller, 1978) y coeficiente de variación (CV) de la altura de agua aplicada en cada uno de los diez riegos en los que se evaluó la uniformidad. Asimismo, se presentan los valores de las dosis medias aplicadas en los ocho riegos restantes que no fueron evaluados.

La altura total del agua aplicada en los 18 riegos fue de 744,9 mm (Tabla 2). La duración media de los diez riegos evaluados fue de 4,88 h, con una pluviometría media de 10,5 mm/h. Los coeficientes de uniformidad de estos diez riegos variaron entre el 79,1 y el 90,3 p. 100, siendo la media de estos valores de 85,5 p. 100. Los valores de uniformidad de distribución (UD) variaron entre el 71,8 p. 100 y el 85,5 p. 100, con un valor medio de 78,7 p. 100.

Estos resultados indican que los riegos evaluados fueron relativamente uniformes, ya que en nueve de los diez riegos el CU superó el 80 p. 100. Asimismo, la distribución del agua de riego siguió una distribución de tipo normal (test χ^2 , $P > 0,05$).

TABLA 2

FECHA, DURACION, PLUVIOMETRIA, ALTURA DE AGUA APLICADA Y PARAMETROS DE UNIFORMIDAD DE LOS DIEZ RIEGOS EVALUADOS EN LA PARCELA EXPERIMENTAL. SE PRESENTAN ADEMAS LA ALTURA DE AGUA APLICADA EN CADA UNO DE LOS DIECIOCHO RIEGOS APLICADOS

Date, duration, precipitation, depth of applied water and uniformity parameters of the 10 irrigation events in the experimental plot. The depth of applied water in each of the 18 irrigation events is also listed

Fecha	Riego N.º	Duración del riego (horas)	Pluviometría media (mm/h)	Agua aplicada			
				Media (mm)	CU (%)	UD (%)	CV (%)
05-06-1991	1	3,28	9,3	30,6	87,9	81,8	16,1
12-06-1991	2	4,57	8,3	37,7	90,3	81,0	13,1
18-06-1991	3	4,98	9,5	47,3	88,7	83,0	17,2
26-06-1991	4	6,38	11,3	72,1	90,0	85,5	12,8
08-07-1991	5	5,85	8,7	51,1	84,2	80,5	22,9
12-07-1991	6			15,3			
18-07-1991	7			22,5			
23-07-1991	8	4,90	9,4	46,0	84,4	75,6	21,0
30-07-1991	9			5,5			
31-07-1991	10			44,4			
07-08-1991	11			40,8			
11-08-1991	12	4,60	12,5	57,5	83,7	75,9	20,0
20-08-1991	13	4,70	11,7	55,0	83,3	75,7	20,4
27-08-1991	14	4,60	11,7	53,9	79,1	71,8	25,8
31-08-1991	15			38,3			
10-09-1991	16			38,9			
20-09-1991	17			27,8			
03-10-1991	18	4,93	12,2	60,3	83,2	76,1	20,9
SUMA				744,9			
MEDIA		4,88	10,5	41,4	85,5	78,7	19,0
DESV. EST		0,82	1,6	22,9	3,6	4,3	4,2
CV (%)		16,80	15,0	55,3	4,2	5,4	22,0

La Figura 2 presenta la evolución de la altura de agua acumulada del riego y de la evapotranspiración media del cultivo de sorgo. Se observa que el agua aplicada en riego en el período comprendido desde el 11 de junio hasta el cosechado del cultivo cubrió las necesidades hídricas del sorgo, ya que este valor fue superior a la ET_{sorgo} (707 mm) calculada

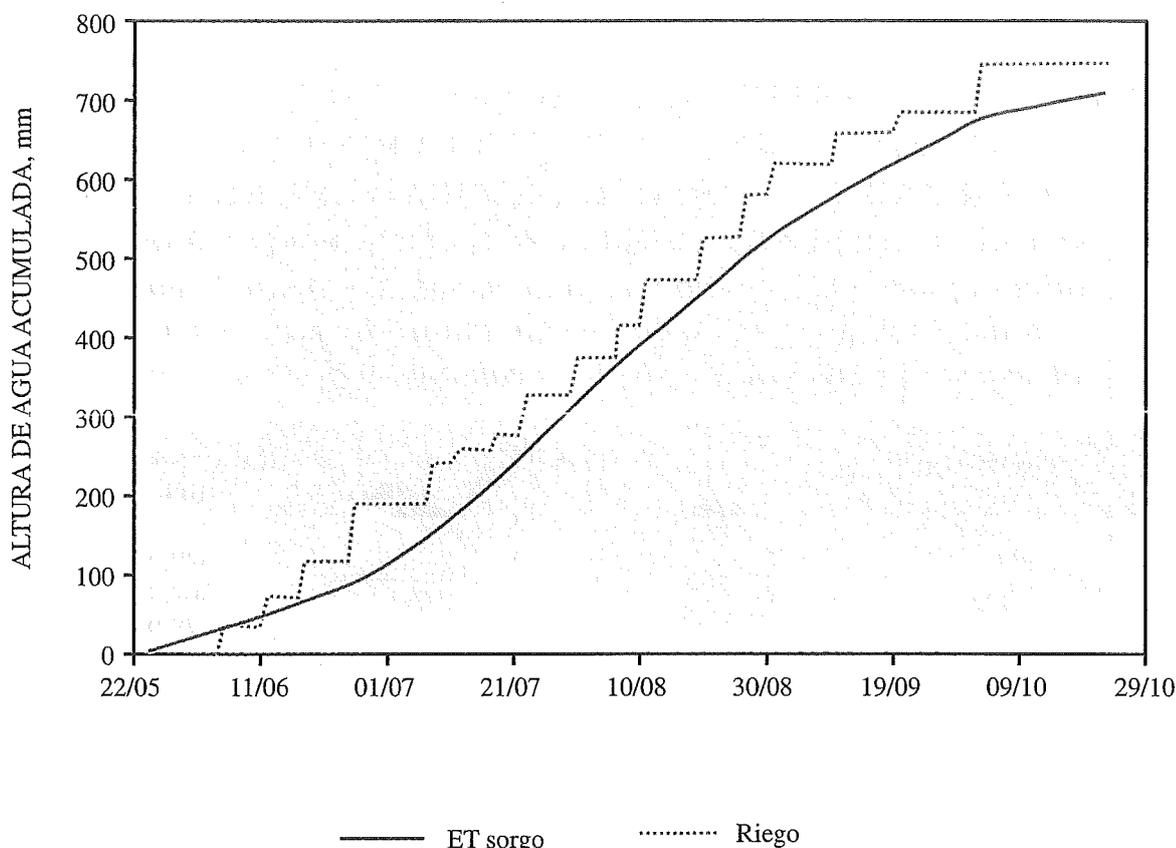


Fig. 2.—Evolución de la altura de agua acumulada en riego y de la evapotranspiración del sorgo (ET_{sorgo}) a lo largo del desarrollo del cultivo

Evolution of accumulated irrigation water applied and seasonal sorghum evapotranspiration (ET_{sorgo}) during crop development

según el método de FAO Blaney-Criddle con los coeficientes de cultivo propuestos por FAO (Doorenbos, Pruitt, 1977) para el año 1991.

Con las alturas acumuladas de agua en los 25 pluviómetros en los diez riegos evaluados se calcularon los valores estacionales de CU, UD y CV, que fueron de 94,4 p. 100, 92,0 p. 100 y 7,5 p. 100, respectivamente (Tabla 3).

Los valores de CU y UD del riego acumulado (Tabla 3) fueron sensiblemente superiores a los obtenidos en los riegos individuales (Tabla 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Pair (1968), Benami, Ofen (1983), Faci, Bercero (1991), Mateos *et al.* (1994) que también encontraron que la uniformidad estacional es superior a la de los riegos individuales debido a la aleatoriedad de la aplicación del agua en los sucesivos riegos por aspersión.

La Figura 3 presenta el mapa de isóneas de las desviaciones relativas a la media de las alturas de agua acumuladas en los diez riegos evaluados. Los valores positivos corresponden a valores superiores al valor medio del agua aplicada (zona clara) que supone el 46,42 p. 100 del área comprendida entre los cuatro aspersores, y los negativos corresponden a valores inferiores al valor medio (zona oscura) que supone el 53,58 p. 100 del área.

TABLA 3

**PLUVIOMETRIAS MEDIAS, ALTURAS DE AGUA DE RIEGO
ACUMULADAS EN LOS 25 PLUVIOMETROS
Y PARAMETROS DE UNIFORMIDAD DEL RIEGO
ACUMULADO PARA LOS DIEZ RIEGOS EVALUADOS**
*Values of mean precipitation and accumulated applied depths
in the 25 pluviometers, and mean uniformity parameters
of seasonal irrigation for the ten evaluated irrigation events*

Pluviómetro n.º	Pluviometría (mm/h)	Altura acumulada (mm)
1	10,7	529,0
2	11,5	562,8
3	9,6	478,0
4	10,6	513,2
5	10,1	495,3
6	10,3	510,4
7	10,7	525,8
8	10,2	496,4
9	11,4	551,9
10	11,9	580,2
11	8,8	434,2
12	10,2	498,9
13	10,0	487,0
14	9,9	487,4
15	10,5	513,8
16	10,5	511,0
17	10,9	526,5
18	9,6	465,6
19	10,1	493,9
20	11,4	566,6
21	9,1	441,5
22	10,3	497,1
23	10,2	493,5
24	11,7	510,3
25	12,1	587,0
MEDIA	10,5	510,3
DESV. EST	0,8	38,3
CU	93,6	94,4
UD	91,4	92,0
CV	8,0	7,5

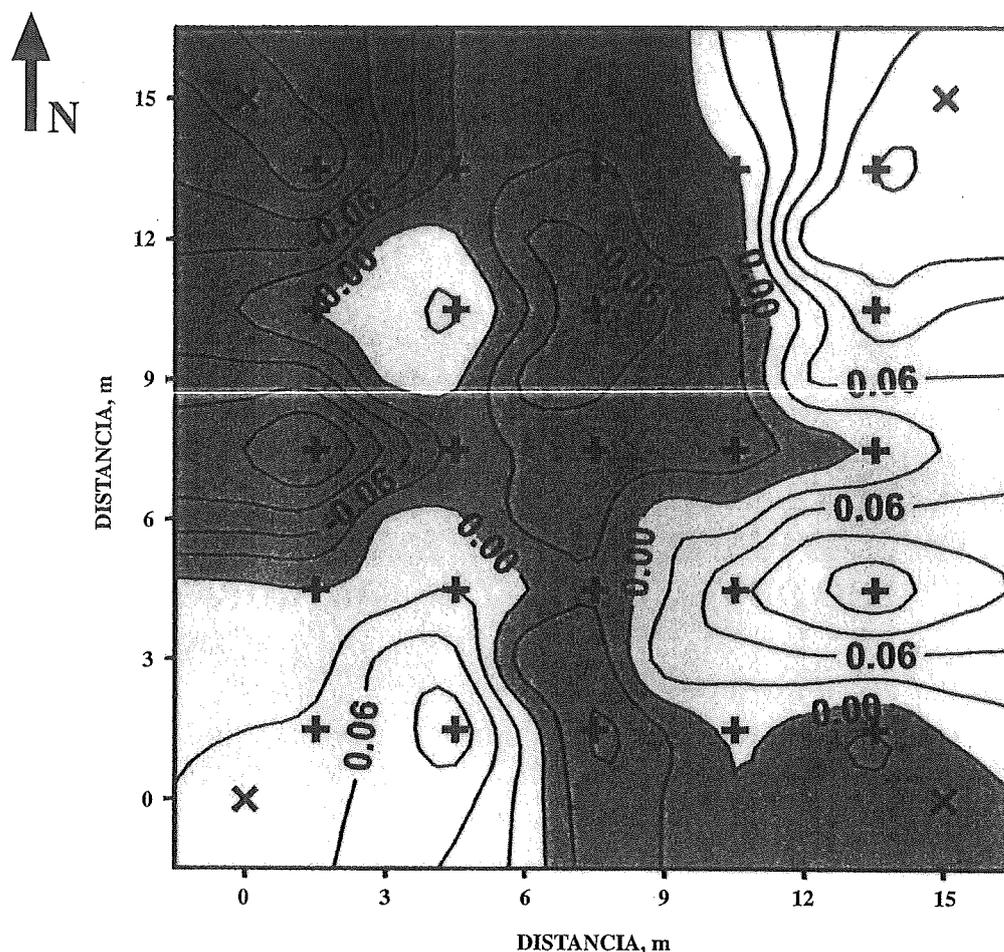


Fig. 3.—Isolinías de las desviaciones relativas respecto a la media de la altura de riego acumulada (mm) en los diez riegos evaluados.

El símbolo + indica la posición de los pluviómetros y el símbolo x la situación de los aspersores

Isolines of the relative deviations from the mean of the accumulated irrigation water applied (mm) in the 10 evaluated irrigation events

Symbol + shows the location of pluviometers and symbol x shows the location of sprinklers

En la Tabla 4 se presentan los valores de la altura media de agua acumulada (mm), así como su desviación estándar y coeficiente de variación en función de la distancia del pluviómetro al aspersor, siendo n el número de pluviómetros situados a una determinada distancia. Se puede observar que la cantidad de agua acumulada media ha sido ligeramente mayor en los pluviómetros más cercanos a los aspersores, aunque el análisis de regresión no indicó una correlación significativa ($\alpha = 0,05$) entre estas cantidades de agua acumulada en los pluviómetros respecto a su distancia a los aspersores. El análisis de cada riego individual indicó que no existía un efecto de la distancia del pluviómetro al aspersor en la cantidad de agua aplicada, excepto en el riego 14 (27-8-91). Esto pudo ser debido al mayor valor de la velocidad del viento acaecido durante este riego (del orden de 17 km/h) que también parece haber influido en el menor valor del CU y UD, y en el mayor del CV respecto al de los demás riegos efectuados. En diferentes sistemas de riego por aspersión instalados

en distintas zonas regables de Aragón y para riegos individuales de corta duración (inferior a los tiempos de riego de los cultivos), Faci, Bercero (1991) encontraron que por encima de un valor umbral de velocidad del viento (15,5 km/h medido a 2 m de altura) se producía un rápido descenso del coeficiente de uniformidad del riego. Para los sistemas fijos, este valor fue de sólo 7,6 km/h. Asimismo, se evidenció que cuanto mayor es el tiempo de aplicación del riego mayor es la uniformidad obtenida y, además, la uniformidad estacional, resultado de la suma de los sucesivos riegos, es en general mayor que la uniformidad de un riego individual.

TABLA 4

VALORES MEDIOS DE LA ALTURA DE AGUA ACUMULADA (mm), DESVIACION ESTANDAR (mm) Y COEFICIENTE DE VARIACION (CV) EN FUNCION DE LA DISTANCIA DE LOS PLUVIOMETROS A LOS ASPERSORES, SIENDO N EL NUMERO DE PLUVIOMETROS QUE CORRESPONDEN A UNA DETERMINADA DISTANCIA

Mean values of accumulated depth of applied water (mm), standard deviation (mm) and coefficient of variation (CV) as a function of the distance between the pluviometers and the sprinkler. The n values correspond to the number of pluviometers located at a given distance

Distancia (m)	Altura media acumulada	Desviación estándar	CV (%)	n
2,1	513,20	61,0	11,9	4
4,7	531,44	32,57	6,13	8
6,4	524,52	23,74	4,53	4
7,6	479,90	33,81	7,04	4
8,7	487,06	15,16	3,11	4
10,5	486,97			1

Se puede concluir que no existe un efecto de la distancia del pluviómetro al aspersor en la cantidad de agua aplicada en los riegos individuales (excepto para el riego 14) ni para el agua acumulada en el conjunto de riegos que tuvo un coeficiente de correlación del -0,36, no significativo ($P > 0,05$).

**Contenido de humedad gravimétrica del suelo al final del ciclo del cultivo.
Percolación y fracción de lavado.**

En la Tabla 5 se presentan los valores de la altura de agua retenida en el perfil de 0 a 60 cm del suelo al final del ciclo del cultivo. Se observa que la altura de agua varía entre un valor mínimo de 158 mm en el pluviómetro 12 y un valor máximo de 191 mm en el pluviómetro 25 (situado junto a uno de los aspersores). El valor medio fue de 173,4 mm y el coeficiente de variación fue del 5,11 p. 100, lo cual indica que el agua almacenada en el suelo en el

momento de la cosecha presentó muy poca variación espacial en comparación con la dosis de riego estacional (Fig. 4). Esto pudo ser debido a la redistribución del agua en el suelo a lo largo de la estación de riegos (Wallach, 1990) y a un desarrollo profundo de raíces. Esta menor variabilidad de la humedad del suelo coincide con los resultados de Hart (1972).

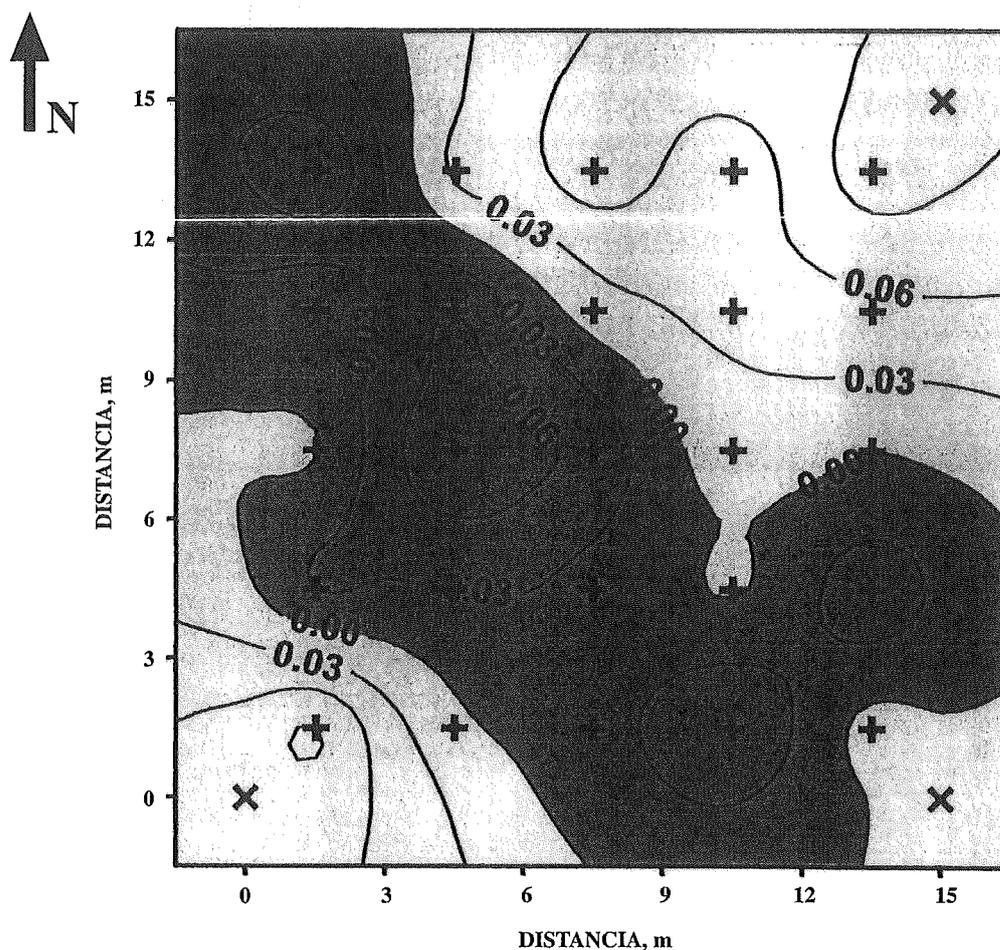


Fig. 4.—Isolíneas de las desviaciones relativas respecto a la media de la altura de agua almacenada en el perfil de 0 a 60 cm del suelo al final del ciclo del cultivo.
El símbolo + indica la posición de los pluviómetros y el símbolo x la situación de los aspersores
Isolines of the relative deviations from the mean of the depth of stored water in the soil profile from 0 to 60 cm at the end of the crop season.
Symbol + shows the location of pluviometers and symbol x shows the location of sprinklers

En la Tabla 5 también se presentan los valores de la percolación profunda y de la fracción de lavado (FL) estimadas en cada uno de los 25 puntos establecidos en la parcela experimental. En los 25 puntos de control existió percolación con un valor medio de 113,4 mm y un CV del 32,38 p. 100. La fracción de lavado media correspondiente a estos valores de percolación fue de 0,13 y su CV del 28,24 p. 100, valor superior al CV del agua aplicada en riego (7,5 p. 100) y del agua almacenada en el suelo (5,1 p. 100). El hecho de que la FL haya sido positiva en todos los puntos de control explica el menor valor de CV del agua almacenada en el suelo en cosecha.

TABLA 5

ALTURA DE AGUA RETENIDA EN EL PERFIL DE 0 A 60 cm DEL SUELO MEDIA AL FINAL DEL CICLO DEL CULTIVO Y PERCOLACION (mm) Y FRACCION DE LAVADO ESTIMADAS JUNTO A CADA UNO DE LOS 25 PLUVIOMETROS CONSIDERADOS, ASI COMO SU VALOR MEDIO, DESVIACION ESTANDAR Y COEFICIENTE DE VARIACION (CV)

Depth of water stored in the 0 to 60 cm soil profile measured at the end of the crop season and percolation (mm) and leaching fraction estimated near to the 25 pluviometers. The mean value, standard deviation and coefficient of variation are also listed

Pluviómetro	Humedad (mm/60 cm)	Fracción de lavado	Percolación (mm)
1	189,1	0,14	116,34
2	174,7	0,19	164,54
3	169,8	0,11	85,64
4	163,5	0,15	126,14
5	174,9	0,12	96,84
6	168,0	0,14	118,84
7	168,1	0,16	134,14
8	170,1	0,13	102,74
9	173,9	0,18	154,44
10	164,9	0,21	191,74
11	173,6	0,05	37,04
12	157,7	0,14	117,64
13	164,6	0,12	98,84
14	176,2	0,11	87,64
15	173,5	0,14	116,74
16	172,1	0,14	115,35
17	163,1	0,16	139,84
18	175,9	0,08	66,14
19	180,8	0,11	89,54
20	182,6	0,18	160,44
21	158,7	0,08	59,24
22	179,5	0,11	94,04
23	186,5	0,10	83,44
24	180,7	0,13	106,04
25	191,5	0,19	171,94
MEDIA	173,4	0,13	113,41
DESV. EST	8,9	0,04	36,72
CV	5,1	28,24	32,38

Medidas del crecimiento vegetativo del sorgo: evolución de la altura del cultivo y del suelo sombreado.

En la Tabla 6 se presentan la media y el coeficiente de variación de la altura del cultivo y del suelo sombreado en diversas fechas durante el ciclo del cultivo de sorgo hasta que se alcanzaron los valores máximos para estos dos parámetros de crecimiento. El cultivo tuvo un desarrollo muy homogéneo en altura a lo largo de su ciclo de cultivo. La altura máxima se alcanzó a mediados de agosto con un valor medio de 99,0 cm. El valor medio del porcentaje de suelo sombreado tuvo una evolución con mayor variabilidad que la altura, alcanzando un valor máximo de 87,6 p. 100. La mayor variabilidad observada en el porcentaje de cobertura del sorgo en la fase inicial del cultivo es debida a los pequeños valores de este parámetro en este período y a la propia variabilidad del sorgo en la producción de hijuelos que aun manteniendo la misma altura de planta pueden cambiar significativamente el porcentaje de suelo sombreado. Así, por ejemplo, el 9 de julio de 1991 el porcentaje de suelo sombreado medio fue de solamente 9,8 p. 100, con un CV del 51,6 p. 100 ocasionado fundamentalmente por el efecto de los hijuelos ya que el CV de la altura era de solamente 12,2 p. 100.

TABLA 6

VALORES MEDIOS Y COEFICIENTES DE VARIACION DE LA ALTURA DEL CULTIVO Y DEL PORCENTAJE DE SUELO SOMBREADO EN EL CULTIVO DE SORGO EN DISTINTAS FECHAS DE SU DESARROLLO*

Mean values and coefficient of variation of height and soil ground cover of sorghum crop at different dates

Fecha	Altura del cultivo		Suelo sombreado	
	Media (cm)	CV (%)	Media (cm)	CV (%)
19-06-1991	14,6	13,2		
04-07-1991	22,9	11,0		
09-07-1991	29,3	12,2	9,8	51,6
24-07-1991	70,7	15,1	44,7	30,9
30-07-1991	84,8	14,6		
01-08-1991	88,3	15,1	72,2	31,1
12-08-1991	99,0	11,7	87,6	12,7

* Para cada fecha los valores de la altura corresponden a 75 observaciones (tres plantas marcadas junto a cada pluviómetro) y los valores de suelo sombreado a 25 observaciones, donde cada observación corresponde a una miniparcela de 1 m² de superficie situada junto a cada pluviómetro.

For each date, mean values correspond to 75 observations for height and 25 observations for ground cover. Each observation corresponds to one plant for height and 1 m² for ground cover.

Rendimiento del sorgo y sus componentes

La Tabla 7 presenta la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación del rendimiento, producción de materia seca (MS), índice de cosecha (IC) y contribución del

rendimiento de las panículas principales y axilares, medidos en 25 miniparcelas de 1 m² adyacentes a los pluviómetros.

La producción de materia seca fue de 2.263 g/m² con un CV del 23,7 p. 100. El rendimiento medio de grano ha sido de 806,5 g/m² con un CV del 18,7 p. 100. De la producción en grano, el 84,3 p. 100 corresponde a panículas principales y el 15,7 p. 100 restante a las panículas axilares. Las panículas principales tuvieron un peso de grano medio de 23,7 g, mientras que las panículas axilares tuvieron solamente un peso de grano de 6,0 g. Es de destacar que el peso de mil granos fue igual (19,9 g) en panículas principales y axilares. El número de granos por panícula fue de 1.199,2 en las panículas principales y de solamente 303,9 en las axilares. El peso de grano por panícula y número de granos por panícula en panículas principales y axilares tuvieron CV altos (entre 39,3 y 40,3 p. 100). Los mayores valores de CV se produjeron en el peso de grano por m² y la contribución al rendimiento de las panículas axilares con valores del 43,2 y 42,7 p. 100, respectivamente.

La variabilidad del rendimiento fue debida fundamentalmente a la variabilidad encontrada en la contribución de las panículas axilares al rendimiento final y también, pero en menor medida, a la propia variabilidad de las panículas principales (Tabla 7).

TABLA 7

**VALORES DE LA MEDIA, DESVIACION ESTANDAR
Y COEFICIENTE DE VARIACION DE LOS RENDIMIENTOS
Y SUS COMPONENTES DEL CULTIVO DE SORGO***

Mean values, standard desviation and coefficient of variation of sorghum yield and its components

Rendimiento	Media	Desv. est	CV (%)
N.º panículas por planta	1,65	0,20	11,9
Materia seca (g/m ²)	2.263,0	535,5	23,7
Rend. grano seco (g/m ²)	806,5	151,1	18,7
Índice de cosecha	0,36	0,04	10,4
PANICULAS PRINCIPALES			
N.º panículas principales por m ²	30,8	5,3	17,2
Peso del grano por panícula (g)	23,7	9,6	40,3
N.º de granos por panícula	1.199,2	473,7	39,5
Peso de mil granos (g)	19,8	1,3	6,5
Peso de grano seco (g/m ²)	691,0	132,6	19,2
Contribución al rendimiento (%)	84,3	6,7	8,0
PANICULAS AXILARES			
N.º panículas axilares por m ²	20,1	7,1	35,4
Peso del grano por panícula (g)	6,0	2,4	39,3
N.º de granos por panícula	303,9	120,8	39,8
Peso de mil granos (g)	19,9	1,6	8,1
Peso de grano seco (g/m ²)	115,5	49,9	43,2
Contribución al rendimiento (%)	15,7	6,7	42,7

* Las medidas se efectuaron en una superficie de 1 m² adyacente a cada uno de los 25 pluviómetros.
Each observation corresponds to 1 m² adjacent to each pluviometer.

La Figura 5 presenta el mapa de isólinas de las desviaciones del rendimiento en grano respecto a los valores medios obtenidos en 25 miniparcelas de 1 m² de superficie situadas junto a cada uno de los pluviómetros. Los valores positivos corresponden a valores superiores al valor medio del rendimiento en grano (zona clara) que supone el 48,27 p. 100 del área comprendida entre los cuatro aspersores, y los negativos corresponden a valores inferiores al valor medio (zona oscura) que supone el 51,73 p. 100 del área. Los valores del rendimiento han seguido una distribución de tipo normal (test χ^2 , $P > 0,05$).

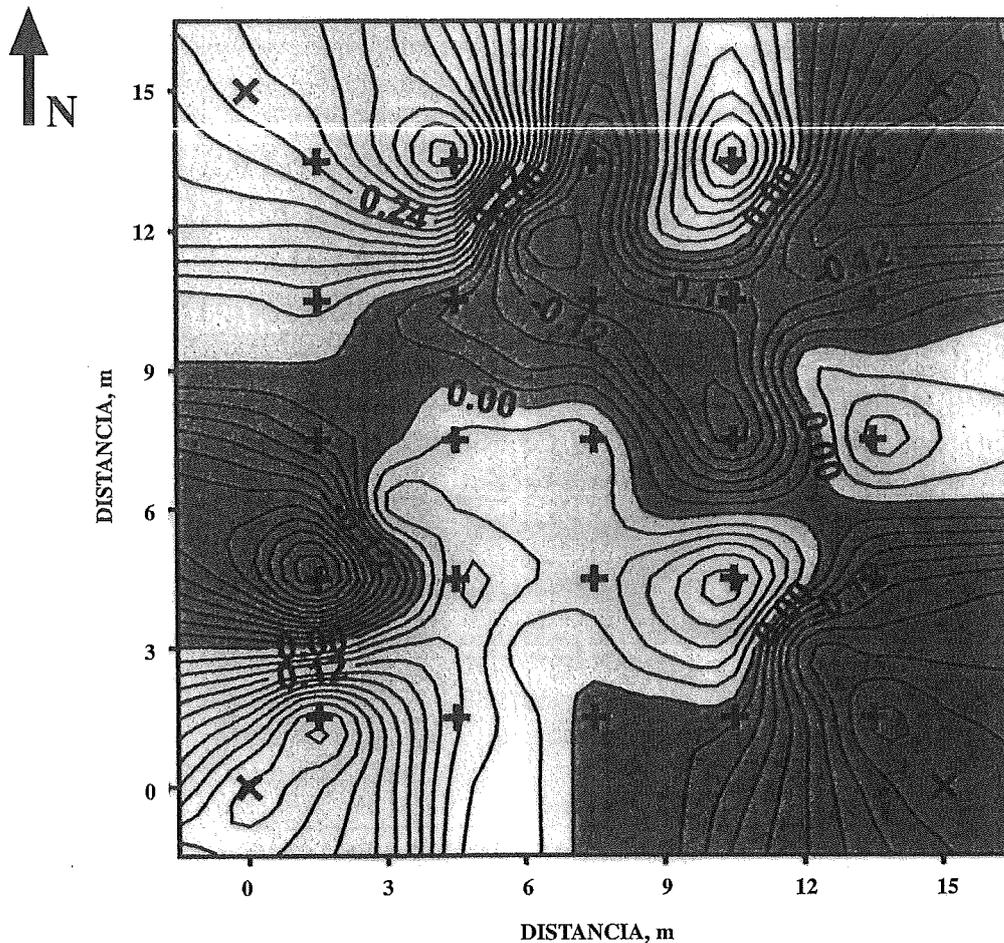


Fig. 5.—Isólinas de las desviaciones relativas respecto a los valores medios de rendimiento en grano seco (g/m²) obtenidos en miniparcelas de 1 m² situadas junto a cada uno de los 25 pluviómetros. El símbolo + indica la posición de los pluviómetros y el símbolo x la situación de los aspersores. *Isolines of the relative deviations from the mean in g/m² for the dry grain yield obtained in 1 m² miniplots near each of the 25 pluviometers. Symbol + shows the location of pluviometers and symbol x shows the location of sprinklers*

Correlación entre el agua aplicada, la altura de agua almacenada en el suelo el día de la recolección, la percolación y la fracción de lavado frente al rendimiento y sus componentes

La Tabla 8 muestra los coeficientes de correlación obtenidos entre el agua aplicada, la altura de agua almacenada en el suelo en recolección, la percolación y la FL frente al ren-

dimiento y sus componentes. El agua almacenada en el suelo en la época de cosechado no mostró una correlación significativa ($\alpha = 0,05$) ni con el agua aplicada en el riego, ni con la percolación o la fracción de lavado, ni con los rendimientos ni con sus componentes. Las correlaciones entre la cantidad estacional de agua aplicada en el riego, la percolación y la fracción de lavado frente al peso de grano por panícula principal, al número de granos por panícula principal y al número de panículas principales y axilares por m^2 han sido significativas ($\alpha = 0,05$), mientras que el resto de correlaciones de estos tres parámetros con los restantes componentes del rendimiento no fue significativa.

TABLA 8

COEFICIENTES DE CORRELACION ENTRE EL AGUA APLICADA, EL AGUA ALMACENADA EN EL SUELO EL DIA DE LA COSECHA, LA PERCOLACION, LA FRACCION DE LAVADO Y EL RENDIMIENTO Y SUS COMPONENTES

Correlation coefficients between water applied and depth of water stored in the soil at harvest, the percolation, the leaching fraction and sorghum yield and its components

Rendimientos	Riego acumulado (mm)	Agua almacenada en el suelo (mm)	Percolación (mm)	Fracción de lavado
Riego acumulado (mm)	—	0,29 ns	0,97*	0,96*
Materia seca (g/m^2)	-0,18 ns	-0,05 ns	-0,18 ns	-0,17 ns
Rend. grano seco (g/m^2)	-0,06 ns	-0,02 ns	-0,05 ns	-0,05 ns
Índice de cosecha	-0,14 ns	-0,30 ns	-0,07 ns	-0,07 ns
N.º panículas por planta	0,15 ns	0,005 ns	0,15 ns	0,14 ns
PANICULAS PRINCIPALES				
N.º panículas principales por m^2	0,60*	0,19 ns	0,58*	0,58*
Peso del grano por panícula (g)	-0,44*	-0,23 ns	-0,40*	-0,41*
N.º de granos por panícula	-0,47*	-0,24 ns	-0,43*	-0,43*
Peso de mil granos (g)	0,22 ns	0,11 ns	0,20 ns	0,18 ns
Peso de grano seco (g/m^2)	-0,17 ns	-0,05 ns	-0,16 ns	-0,16 ns
Contribución al rend. final (%)	0,12 ns	0,33 ns	0,04 ns	0,04 ns
PANICULAS AXILARES				
N.º panículas axilares por m^2	0,49*	0,19 ns	0,47*	0,45*
Peso del grano por panícula (g)	-0,04 ns	0,01 ns	-0,04 ns	-0,02 ns
N.º de granos por panícula	-0,09 ns	-0,00 ns	-0,09 ns	-0,06 ns
Peso de mil granos (g)	0,25 ns	0,02 ns	0,26 ns	0,24 ns
Peso de grano seco (g/m^2)	0,28 ns	0,07 ns	0,27 ns	0,28 ns
Contribución al rend. final (%)	-0,12 ns	-0,33 ns	-0,04 ns	-0,04 ns

ns = no significativo al nivel de significación $\alpha = 0,05$.

* = significativo al nivel de significación $\alpha = 0,05$.

Hay que tener en cuenta que estos resultados se han obtenido en sorgo que es un cultivo con una alta capacidad de emisión de hijuelos que pueden contribuir de forma significativa al rendimiento final del cultivo (Faci, 1991). Sin embargo, para otros cultivos como el maíz, con menor capacidad de producir panículas axilares, los resultados hubieran podido ser muy diferentes.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo han confirmado que en un sistema fijo de riego por aspersión, la uniformidad del riego estacional, resultado de la suma de los sucesivos riegos, fue superior a la de los riegos individuales. El CU del riego estacional acumulado fue del 94,4 p. 100 y el CV correspondiente a las alturas acumuladas en los 25 pluviómetros fue del 7,5 p. 100. Esta mayor uniformidad del riego estacional es debida a los procesos de compensación de la variabilidad del agua aplicada a medida que aumenta el número de riegos.

La variabilidad de la lámina de agua almacenada en el suelo en recolección fue menor que la del agua aplicada en riego debido fundamentalmente a que el riego fue uniforme y en cantidad suficiente para cubrir las necesidades hídricas a lo largo de todo el ciclo del cultivo y también a los procesos de redistribución de agua en el suelo. El CV de la lámina de agua almacenada en el suelo en recolección fue de solamente 5,1 p. 100. En todos los puntos de medida hubo percolación, con un CV del 32,4 p. 100. En general, los rendimientos y sus componentes han tenido una variabilidad mayor que la del agua de riego y la de la humedad del suelo. Así, el CV de la producción de la materia seca y del rendimiento en grano fueron del 23,7 p. 100 y 18,7 p. 100, respectivamente, debido fundamentalmente a la diferente contribución de las panículas axilares del sorgo.

El agua almacenada en el suelo al final del ensayo no mostró una correlación significativa ($\alpha = 0,05$) ni con el rendimiento del sorgo ni con ninguno de sus componentes. El agua aplicada en el conjunto de riegos y la fracción de lavado sólo mostraron una correlación significativa ($\alpha = 0,05$) con el peso de grano por panícula, el número de granos por panícula principal y el número de panículas principales y axilares por m².

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) por la concesión de una beca de investigación a M.^a José Berenguer Merelo para la realización de la tesis doctoral en la que se incluye este trabajo, y por la financiación de los proyectos 8084, SC93-059 y SC93-057.

SUMMARY

Variability of applied water and sorghum yield in a solid-set sprinkler irrigation system

Sprinkler irrigation is associated with a certain degree of variability even under good management practices which is reflected in a lack of uniformity in infiltrated water in the soil. This lack of uniformity can negatively affect final crop yields.

In the present study we have determined the variability associated with a solid-set sprinkler irrigation system in water applied, stored water in the soil profile, leaching fraction and sorghum yield and its components in a field experiment in the new irrigated area of Monegros II (Huesca).

Seasonal water applied was 745 mm with a coefficient of variation (CV) of 7,5 p. 100. CV of stored water in the soil at harvest was only 5,1 p. 100. However CV of grain yield and dry matter production was 18,7 p. 100 and 23,7 p. 100 respectively. The results of this study indicated that irrigation water applied variability was not the principal cause of the higher sorghum crop production variability. Sorghum variability was mainly due to high variation in tiller contribution to final yield.

KEY WORDS: Irrigation
Sprinkler
Variability
Redistribution
Yield
Uniformity
Sorghum

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ADAMS J.E., ARKIN G.F., RITCHIE J.T., 1976. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 436-442.
- ARAGÜES R., AMEZKETA E., 1991. Dispersión de arcillas y conductividad hidráulica de cinco horizontes de un suelo salino-sódico. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* Vol. 6(2), 161-169.
- BENAMI A., OFEN A., 1983. Irrigation engineering sprinkler, trickle, surface irrigation. Principles, design and agricultural practices. Irrigation Engineering Scientific Publications, Haifa, Israel. 277 pp.
- BERENGUER M.J., FACI J.M., MARTINEZ-COB A., 1994. Efecto de la cobertura del suelo y de la enmienda de yeso en la infiltración del agua en riego por aspersión. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.*, Vol. 9(3), 451-463.
- CHRISTIANSEN J.E., 1942. Irrigation by sprinkling. *Univ. of California Agric. Exp. Sta. Bull.*, 670. 124 pp.
- CLEMMENS A.J., 1991. Irrigation uniformity relationship for irrigation system management. *J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE.* 117 (5), 682-699.
- COSCULLUELA F., FACI J.M., 1992. Obtención de la función de producción del maíz (*Zea mays* L.) respecto al agua mediante una fuente lineal de aspersión. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.*, Vol. 7(2), 169-194.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 144 pp.
- EASTIN T.D., HULTQUIST T.H., SULLIVAN C.Y., 1973. Physiological maturity in grain sorghum. *Crop Sci.*, 13, 175-178.
- FACI J.M., BERCERO A., 1991. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.*, Vol. 6(2), 171-182.
- HART W.E., 1972. Surface distribution of nonuniformity applied surface waters. *Transactions of ASAE*, 15(4), 656-661, 666.
- HUSANBAKER D.J., BUCKS D.A., 1987. Wheat yield variability in irrigation level basins. *Transactions of the ASAE*, Vol. 30(4), 1099-1104.
- ISAAKS E.H., SRIVASTAVA R.M., 1989. An Introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York. 561 pp.
- LETEY J., 1985. Irrigation uniformity as related to optimum crop production. Additional research is needed. *Irrig. Sci.*, 6, 253-263.
- LETEY J., DINAR A., WOODRING C., OSTER J.D., 1990. An economic analysis of irrigation systems. *Irrig. Sci.*, Vol. II(1), 37-43.
- MARTIN J.H., LEONARD W.H., STAMP D.L., 1976. Principles of field crop production. McMillan, New York, USA, 1118 pp.
- MANTOVANI E.C., 1993. Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, 184 pp.
- MATEOS L., MANTOVANI E.C., VILLALOBOS F.J., 1994. Efecto de la desuniformidad del riego por aspersión sobre la producción de algodón. XII Jornadas sobre Riegos, AERYD, 325-331. Pamplona.
- MERRIAN J.L., KELLER, J., 1978. Farm irrigation system evaluation. A guide for management. Utah state university, Logan, Utah, USA. 271 pp.
- OR D., HANKS R.J., 1992. Soil Water and Crop Yield Spatial Variability Induced by Irrigation Nonuniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 56(1), 226-233.
- PAIR C.H., 1968. Water distribution under sprinkler irrigation. *Transactions of ASAE*, 11(5), 648-651.

- PORTA J., LOPEZ-ACEVEDO M., RODRIGUEZ R., 1986. Técnicas y experimentos en edafología. Col. Of. Eng. Agron. Catal., Barcelona. 282 pp.
- SOIL SURVEY STAFF., 1975. Soil taxonomy. A basis system of soil classification for making and interpreting soil surveys. V.S. Dep. Agric. Soli. Conserv. Sev. Agric. Handb 436.v.s. Gov. Print Off: 754 pp.
- SOIL SURVEY STAFF., 1994. Keys to soil taxonomy. Sixth edition. S.M.S.S.USDA. Washington. 306 pp.
- SOLOMON K.H., 1984. Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrig. Sci.* 5, 161-172 pp.
- STERN J., BRESLER E., 1983. Nonuniform Sprinkler Irrigation and Crop Yield. *Irrig. Sci.*, 4, 17-29.
- TARJUELO J.M., 1995. El riego por aspersión y su tecnología. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, 491 pp.
- WALLACH R., 1990. Effective irrigation uniformity as related to root zone depth. *Irrig. Sci.*, Vol 11(1), 15-21.
- WARRICK A.W., GARDNER W.R., 1983. Crop yield as affected by spatial variations of soil and irrigation. *Water Resources Research*, Vol. 19(1), 181-186.
- WARRICK A.W., HART W.E., YITAYE W.M., 1989. Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. *J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE*, 115(4), 674-686.
- WARRICK A.W., YATES S.R., 1987. Crop field as influenced by irrigation uniformity. In: D. Hillel (ed.) *Advances in irrigation*, Vol. 4. Academic Press. Orlando, Florida, USA, 169-180.