

Pérdidas de agua por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta. II modelos y relaciones

Water losses by evaporation in corn with conventional and zero tilling for different levels of dead covering. II models and relationships

Juan Pacheco Seguí¹, Juliano Gomes de Andrade², Reimar Carlesso³ y Célio Trois⁴

RESUMEN. El objetivo del presente trabajo fue hallar la variación de la evaporación y evapotranspiración del maíz dentro del ciclo de secado, para establecer los modelos que relacionan la extracción de agua de las plantas de maíz con el desarrollo del cultivo, la masa de paja y la suma de grados días. Existe correlación con la extracción media diaria, para la masa de paja (P) y el índice de área foliar (IAF) solamente. La extracción de agua acumulada del cultivo tiene correlación significativa con la masa de paja (P), la altura de las plantas (Altp) y la suma de grados de la temperatura media diaria (SG).

Palabras clave: modelación, evapotranspiración, maíz.

ABSTRACT. The objective of the present work was to find the variation of the evaporation and evapotranspiration of maize in the drying cycle, to establish the models that could relate the extraction of water from the soil with the developing of the plants, the straw mass used as mulch and the sum of days-degrees. Correlations were only found between the mean daily extractions, the straw mass (P) and the foliar area index (FAI). The accumulated water extraction of the crop has significant correlation with the straw mass (P), the height of the plants and the sum of degrees of the mean daily temperature (SG).

Keywords: Modeling, maize, evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración de los cultivos anuales durante sus estados iniciales, tiene lugar fundamentalmente a expensas de la evaporación desde el suelo, es por eso, que la frecuencia de humedecimiento del suelo en ese período tiene una gran influencia en la magnitud de los valores de la evapotranspiración. Ya es bien conocido, que el proceso de evaporación de agua del suelo atraviesa por tres estados (Feddes 1971; Ritchie 1972; Idso *et al.* 1974; Kanemasu *et al.* 1976; Hanks and Hill 1980; Ritchie and Johnson 1990). Durante el estado-1, la tasa

de evaporación es solamente limitada por la cantidad de energía disponible para vaporizar la humedad en la capa superficial del suelo y es similar a la evaporación desde una superficie de agua. Esta fase termina cuando el contenido de humedad en la capa superficial del suelo decrece y el potencial matricial alcanza un valor crítico. Durante el estado-2, la tasa de evaporación está limitada por la falta de agua en la capa superficial de suelo y por las propiedades hidráulicas del mismo, las cuales determinan la transferencia de líquido o vapor de agua a la superficie. En este estado el flujo de agua se mueve en forma de líquido y vapor. El estado-2 termina cuando el movimiento de agua es mínimo y solamente tiene lugar el flujo de vapor

Recibido 29/11/09, aprobado 31/07/11, trabajo 36/11, investigación.

¹ Dr.C., Profesor Titular, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Central de Las Villas, Carretera de Camajuani km 5, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. E-✉: juanps@uclv.edu.cu

² M.Sc., Sistema Irriga. Universidad Federal de Santa Maria, Río Grande del Sur, Brasil.

³ Dr. Profesor Titular del Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad Federal de Santa Maria, Río Grande del Sur, Brasil.

⁴ M.Sc., Sistema Irriga. Universidad Federal de Santa Maria, Río Grande del Sur, Brasil.

a través de los poros del suelo. El estado-3 es caracterizado principalmente por las propiedades físicas y adsorbentes del suelo y la tasa de evaporación es despreciable.

Según Allen *et al.* 1998 para cálculos diarios y precisos, deben usarse dos coeficientes, el coeficiente K_e que relaciona la evaporación del suelo (E_s) con la evapotranspiración de referencia (E_o), lo que permite el cálculo de la evaporación diaria desde el suelo en la ecuación siguiente:

$$E_s = K_e \cdot E_o \quad (1)$$

Mientras que la evapotranspiración del cultivo (E_{tc}) es calculada a partir del concepto de dividir el coeficiente K_c en dos coeficientes, o sea:

$$E_{tc} = (K_e + K_{cb}) \cdot E_o \quad (2)$$

donde:

K_{cb} - se conoce como el coeficiente basal que representa el componente de la transpiración en la E_{tc} .

El uso de cobertura muerta modifica el comportamiento del consumo de agua por evaporación en los ciclos de secado, lo que permite un importante ahorro de agua en los cultivos, así Zhang (2003) reporta un ahorro que va de 40% del agua en las fases iniciales del cultivo hasta 20% en el estado de maduración, habiendo logrado incrementos en la eficiencia de uso del agua de 13 y 18% en trigo y maíz respectivamente.

El objetivo del presente trabajo fue modelar las relaciones existentes entre las pérdidas de agua del suelo, la masa de la cobertura muerta del mismo, algunas variables agrometeorológicas e indicadores fenológicos de las plantas en siembra directa y convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

En un experimento donde se estudió durante 38 días las pérdidas de agua del suelo en el cultivo del maíz, la humedad se midió con TDR 100 y se realizaban lectura cada 15 minutos en las capas de 0-10cm y 10-30cm y se observaron cuatro tratamientos, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Se analizan fundamentalmente dos ciclos de secado para encontrar las relaciones entre la extracción de agua y los tratamientos estudiados.

Se asume que la extracción de agua en el ciclo de secado 6-13 de noviembre a los siete días después de la emergencia ($DDE=7$) y con un Índice de Área Foliar (IAF) muy pequeño (0,085) que corresponde fundamentalmente a la evaporación del suelo descubierto, por ser prácticamente despreciable la transpiración en plantas de una altura inferior a 6 cm. En la Tabla 2, en lugar de K_c se calcula K_e . Por otra parte, la extracción que tiene lugar en el ciclo de secado del 4-8 de diciembre ($IAF=2,78$), se considera que corresponde a la evapotranspiración del cultivo y fue imposible separar sus dos componentes. Para el primero y segundo ciclos de secado la E_o media fue de 4,72 y 5,55 mm/día respectivamente calculada por Penman-Monteith. Conocida la evaporación del suelo se estimó el coeficiente K_e y también el coeficiente de reducción (K_r) de la evaporación, atendiendo a Allen *et al.* (1998) que establece que:

$$K_r = K_e / K_{e_{max}} \quad (3)$$

donde:

K_e - coeficiente que relaciona la evaporación del suelo con la evapotranspiración de referencia.

$K_{e_{max}}$ - coeficiente que tiene lugar cuando se produce la máxima evaporación desde suelo, al inicio de un ciclo de secado.

TABLA 1. Tratamientos estudiados en el cultivo de maíz

Tratamiento	Sistema de cultivo	Cobertura de paja en t/ha
1.SD ₀	Siembra directa	0
2.SD ₃	Siembra directa	3
3.SD ₆	Siembra directa	6
4.SC	Preparación de suelo convencional	0

Para correlacionar la extracción media diaria de agua del suelo, se tomó el valor medio de las pérdidas de agua en tres ciclos de secado de seis días de duración en la profundidad 0-10 cm, correspondientes a los períodos 6-11 noviembre, 26 nov-1ro diciembre y 3-8 diciembre y para la extracción acumulada se procesaron los datos para cinco edades diferentes de las plantas, o sea DDE 7, 15, 20, 26 y 34. Como variables independientes se tomaron las siguientes: Peso de la paja en t/ha (P), la evapotranspiración de referencia diaria en mm (E_o), el Índice de área foliar (IAF), los días transcurridos después de la emergencia del cultivo (DDE), la suma de grados días de la temperatura media diaria desde la emergencia de las plantas (SG) y la altura de la plantas en cm ($Altp$). Finalmente se calcularon las ecuaciones de regresión, todos los datos fueron procesados con el paquete estadístico SAS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaporación diaria de agua del suelo, en un ciclo de secado al inicio del cultivo aparece en la Tabla 2, en la misma aparecen también los coeficientes K_e para cada tratamiento.

Los tratamientos con cobertura muerta muestran valores de evaporación al inicio del ciclo de secado que son marcadamente inferiores. Sin embargo, el valor medio de la evaporación del ciclo de secado para los dos tratamientos sin cobertura muerta resultó igual con independencia del tipo de preparación del suelo. La siembra directa mantiene un nivel más bajo de evaporación, pero es capaz de suministrar agua a la superficie del suelo por un período de tiempo más largo. El tratamiento con siembra convencional sin cobertura, alcanzó el valor más alto de K_e , el cual, llegó hasta 0,87. El valor medio de $K_e = 0,40$ obtenido para los tratamientos sin cobertura

es muy similar al valor medio de Kc_{ini} que recomienda Allen *et al.* (1998) para suelos con irrigaciones a intervalos de 7 días, lo que demuestra la precisión de los datos obtenidos.

El coeficiente de reducción de la evaporación se presenta también en la Tabla 2, se destaca en el tratamiento con siembra convencional una rápida reducción de la evaporación, la cual, a los siete días de la saturación es el 14% del valor máximo del ciclo de secado, sin embargo, el uso de siembra directa sin cobertura, mantiene más altos niveles de suministro de agua a partir del tercer día de saturado el suelo y un valor más alto (23%) al final del ciclo de secado, los tratamientos con 3 y 6 t/ha de cobertura muerta presentan una tasa estable de evaporación hasta transcurridos tres días después de saturado el suelo y trascurridos 7 días del ciclo de secado evaporan 41 y 63 % del valor máximo obtenido al inicio del ciclo. Lo anterior demuestra las posibilidades de la cobertura con paja para la conservación de la humedad y su utilización por la planta en días posteriores.

En la Tabla 3 se presenta la extracción de agua del maíz en un ciclo de secado, 34 días después de la emergencia, en la misma se destacan los más altos coeficientes Kc para la siembra directa sin paja en los primeros dos días del ciclo de secado, pero después es sobrepasado por el tratamiento con 6 t/ha de paja. En los tratamientos de siembra directa el valor del Kc medio en el ciclo de secado varía de 0,40 a 0,47 muy superior al valor medio de 0,36 alcanzado por la siembra convencional, eso demuestra el mayor suministro de agua a las plantas que se logra en el suelo sin labrar, por otra parte en la medida que se añade paja al suelo se produce una economía de agua que hace disminuir el Kc medio del ciclo de secado hasta 0,40 en el tratamiento de 6 t/ha de paja en comparación con el 0,46 del tratamiento de siembra directa sin paja. En un ciclo de secado de 5 días, la siembra directa con 6 t/ha de paja ahorra 1,78 mm de agua en comparación con la siembra directa sin paja.

TABLA 2. La evaporación de agua del suelo en un ciclo de secado

Ciclo de secado	Evaporación (Es) mm/día				Coef. de evaporación del suelo (Ke)				Coef. de reducción de la evaporación de agua del suelo (Kr)			
	SD ₀	SD ₃	SD ₆	SC ₀	SD ₀	SD ₃	SD ₆	SC ₀	SD ₀	SD ₃	SD ₆	SC ₀
Nov 6	3,40	2,25	1,21	4,09	0,72	0,48	0,26	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00
7	3,40		1,21	4,09	0,72	0,48	0,26	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00
8	3,02	2,25	1,21	2,37	0,64	0,48	0,26	0,50	0,89	1,00	1,00	0,58
9	1,56	2,25	1,18	1,40	0,33	0,42	0,25	0,30	0,46	0,88	0,97	0,34
10	1,12	1,97	1,07	1,07	0,24	0,30	0,23	0,23	0,33	0,64	0,89	0,26
11	0,89	1,43	0,87	0,81	0,19	0,22	0,19	0,17	0,26	0,46	0,72	0,20
12	0,82	1,03	0,80	0,60	0,17	0,19	0,17	0,13	0,24	0,41	0,66	0,15
13	0,78	0,91	0,76	0,56	0,16	0,19	0,16	0,12	0,23	0,41	0,63	0,14
13	1,87	0,92	1,03	1,87	0,40	0,35	0,22	0,40	-	-	-	-
Media		1,63										

El análisis de la relación existente entre la extracción diaria de agua del suelo, en el estrato 0-10 cm y otras variables independientes aparece en la Tabla 4, igualmente aparece para la extracción acumulada. En la mencionada tabla se aprecia que existe correlación con la extracción media diaria, para la masa de paja (P) y el índice de área foliar (IAF) solamente, pero cuando el modelo se establece únicamente para siembra directa y no incluye la siembra convencional la correlación es mas fuerte. La correlación entre la extracción diaria y la masa de paja (P) usada como cobertura disminuye en la medida en que avanza la edad del cultivo, esto se debe al efecto compensador que ejerce el área foliar del cultivo, con lo cual disminuye el efecto de la cobertura muerta.

TABLA 3. Extracción de agua por el maíz en un ciclo de secado (0-10 cm)

Ciclo de secado	Extracción en mm/día				Coeficientes Kc			
	SD ₀	SD ₃	SD ₆	SC ₀	SD ₀	SD ₃	SD ₆	SC ₀
Dic 4	4,977	4,604	3,064	4,756	0,897	0,830	0,552	0,857
5	3,391	3,361	2,723	2,401	0,611	0,606	0,491	0,433
6	1,933	1,895	2,116	1,130	0,348	0,342	0,381	0,204
7	1,430	1,060	1,718	0,929	0,258	0,191	0,309	0,167
8	1,276	1,188	1,610	0,839	0,230	0,214	0,290	0,151
Suma/Media	13,01	12,11	11,23	10,06	0,469	0,436	0,405	0,362

El valor de la extracción media diaria en un ciclo de secado para las condiciones analizadas no tiene correlación con la edad del cultivo, la altura de las plantas y la suma de los grados días en el momento donde se origina el ciclo de secado. La extracción acumulada del cultivo tiene correlación significativa con la masa de paja (P), la altura de las plantas y la suma de grados de la temperatura media diaria.

TABLA 4. Resultados de los análisis de correlación de Pearson

	Para la extracción media diaria					Para la extracción acumulada					
	Modelo general SD+SC	Modelo para SD	DDE 7	DDE 26	DDE 34	Modelo para SD	DDE 7	DDE 15	DDE 20	DDE 26	DDE 34
R2 Modelo	0,75*	0,81*	0,86*	0,42*	0,38*	0,94*	0,85*	0,91*	0,90*	0,91*	0,92*
P t/ha											
R ² parcial	0,25*	0,21*	0,86*	0,42*	0,38*	0,17*	0,85*	0,91*	0,90*	0,91*	0,92*
Eto. mm	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.i	n.i	n.i	n.i	n.i	n.i
IAF	0,50*	0,59*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
R ² parcial											
DDE											
R ² parcial	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Altp cm.											
R ² parcial	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0,009*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
SG											
R ² parcial	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0,76*	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

*= Significativo para un nivel de probabilidad de 0.05, n.s = No significativo. n.i = No incluido en ese análisis.

En la Tabla 5 se muestran las características del modelo obtenido. Se estableció una ecuación general para calcular la extracción media diaria para todos los tratamientos estudiados y otro modelo para la siembra directa solamente. Se obtuvieron modelos para calcular la extracción media diaria en tres momentos diferentes del ciclo vegetativo del cultivo, o sea, DDE 7, 26 y 34 y se obtuvieron modelos para estimar la extracción acumulada del maíz en cinco momentos, o sea, en DDE 7, 15, 20, 26 y 34.

Las ecuaciones obtenidas para la extracción media diaria (Extmdiaría) fueron las siguientes:

$$\text{Extmdiaría} = 1,76 - 0,11 P + 0,36 \text{ IAF (para SD y SC)} \quad (4)$$

Variables	R2parcial	R2Model
IAF	0,50	0,50
P	0,25	0,75

TABLA 5. Características de los modelos obtenidos

	Extracción media diaria					Extracción acumulada					
	Modelo general	Para SD	En DDE 7	En DDE 26	En DDE 34	Modelo para SD	En DDE 7	En DDE 15	En DDE 20	En DDE 26	En DDE 34
Intercepto	1,76	1,71	1,96	2,07	2,68	5,66	6,66	18,35	25,27	35,19	54,02
Coef. P	-0,11	-0,11	-0,18	-0,08	-0,08	-2,36	-0,83	-1,60	-2,35	-3,25	-4,10
Coef. IAF	0,36	0,40	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Coef. DDE	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
Coef. Altp	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0,27	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
SG	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	0,08	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s

n.s = No significativo

$$\text{Extmd} = 1,71 - 0,11 P + 0,40 \text{ IAF (para SD solamente)} \quad (5)$$

Variables	R2parcial	R2 Model
IAF	0,59	0,59
P	0,22	0,81

Para DDE 7

$$\text{Extmd} = 1,96 - 0,18 P \quad (6)$$

Variables	R2parcial	R2 Model
Paja	0,86	0,86

Para DDE 26

$$\text{Extmd} = 2,07 - 0,08 P \quad (7)$$

Variables	R2parcial	R2 Model
Paja	0,42	0,42

Para DDE 34

$$\text{Extmd} = 2,68 - 0,08 P \quad (8)$$

Variables	R2parcial	R2 Model
Paja	0,38	0,38

Las ecuaciones obtenidas para la extracción acumulada (ExtAc) fueron las siguientes:

Para Siembra Directa solamente

$$\text{ExtAc} = 5,66 - 2,36 P + 0,08 SG + 0,27 \text{Altp} \quad (9)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
SG	0,76	0,76
P	0,17	0,93
Altp	0,009	0,94

Para DDE 7

$$\text{ExtAc} = 6,66 - 0,83 P \quad (10)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
P	0,85	0,85

Para DDE 15

$$\text{ExtAc} = 18,35 - 1,60 P \quad (11)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
P	0,91	0,91

Para DDE 20

$$\text{ExtAc} = 25,27 - 2,35 P \quad (12)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
P	0,90	0,90

Para DDE 26

$$\text{ExtAc} = 35,19 - 3,25 P \quad (13)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
P	0,91	0,91

Para DDE 34

$$\text{ExtAc} = 54,02 - 4,10 P \quad (14)$$

Variables	R ² parcial	R ² Model
P	0,92	0,92

En las Figuras 1 y 2 se presentan los resultados de la capacidad predictiva de las ecuaciones 5 y 9 para la extracción media diaria y la extracción acumulada en siembra directa de maíz. Según la dispersión de los puntos alrededor de la línea de tendencia se observa una mejor predicción por la ecuación de la extracción acumulada. La ecuación para la extracción media diaria sobreestima ligeramente los valores cuando están por debajo de 1,7 mm y los subestima cuando sobrepasan los 2,0 mm. La ecuación para la extracción acumulada de agua por el maíz presenta un R²= 0,94 y su capacidad de predicción resulta muy alta hasta los 60mm de agua extraídos como puede apreciarse en la figura 2, por la correspondencia entre la línea de tendencia (línea continua) y la línea 1:1 (línea discontinua). En las Figuras 3 y 4 se presenta la relación que existe entre la siembra directa sin cobertura muerta y cuando se usan 3 y 6 t/ha de paja respectivamente. Puede apreciarse que existe un buen ajuste a una ecuación polinómica de segundo grado con un R²= 0,99 en ambos casos. La relación mostrada tendrá una gran utilidad para estimar el efecto de diferentes cantidades de paja sobre la reducción de la extracción de agua por el maíz.

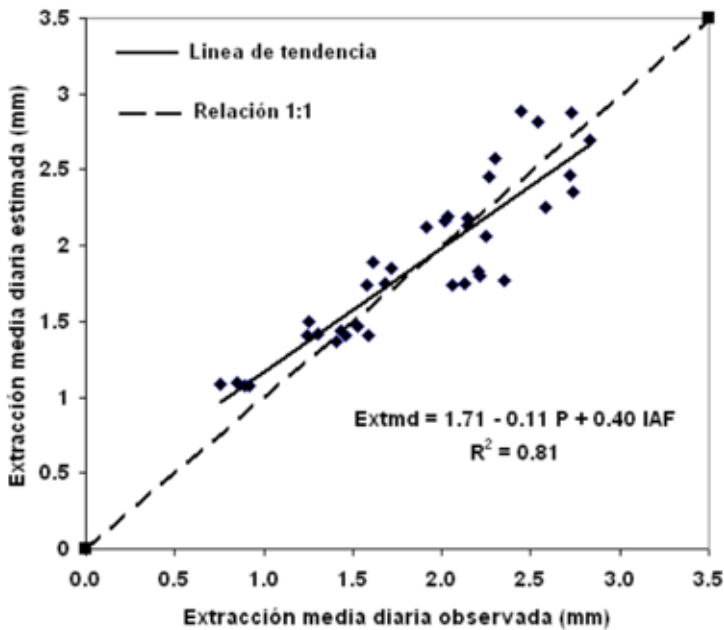


FIGURA 1. Comparación entre los valores estimados y observados para la extracción media diaria del maíz en siembra directa.

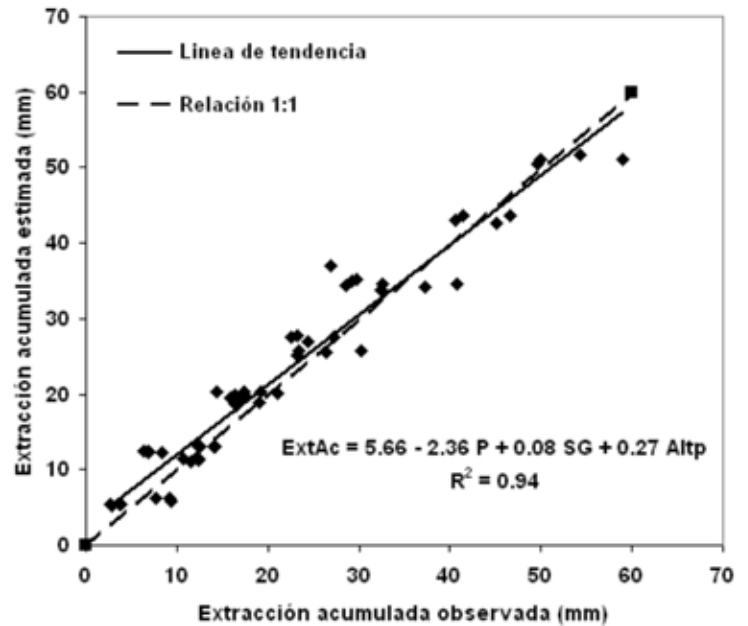


FIGURA 2. Valores estimados y observados para la extracción acumulada del maíz en siembra directa.

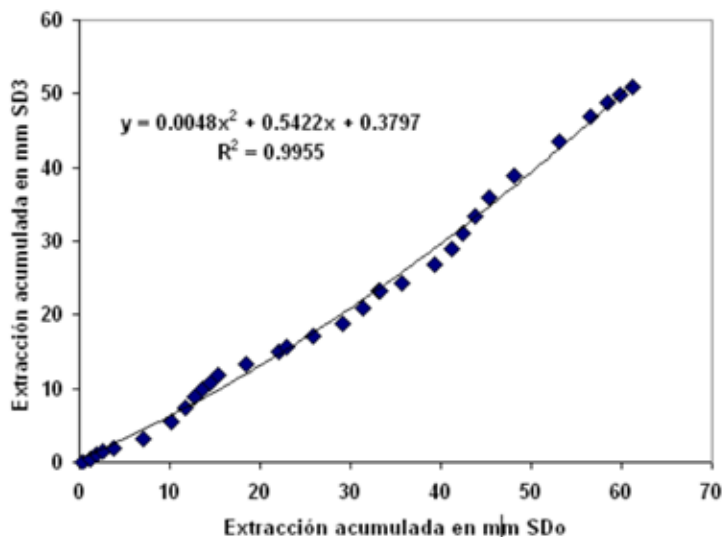


FIGURA 3. Relación entre la extracción acumulada del maíz en siembra directa sin paja y con 3 t/ha de paja.

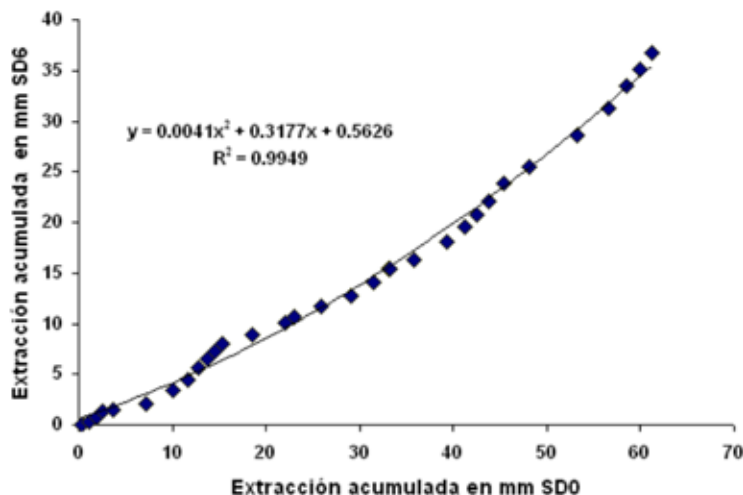


FIGURA 4. Relación entre la extracción acumulada del maíz en siembra directa sin paja y con 6 t/ha de paja.

CONCLUSIONES

- El coeficiente de evaporación medio del ciclo de secado (K_e) para la siembra directa y convencional, ambas sin paja presentó al inicio del ciclo vegetativo del cultivo valores muy semejantes (0,40) y el tratamiento con 6 t/ha de paja reduce su evaporación casi a la mitad de los tratamientos anteriores ($K_e=0,22$).
- Los tratamientos con 3 y 6 t/ha de cobertura muerta presentan una tasa estable de evaporación hasta transcurridos tres días después de saturado el suelo y transcurridos 7 días

del ciclo de secado evaporan 41 y 63% del valor máximo obtenido al inicio del ciclo.

- La extracción media diaria de agua por el maíz tiene una correlación significativa con las t/ha de paja y el índice de área foliar y no presenta correlación con la altura de las plantas, la suma de grados días y los días transcurridos después de la emergencia de las plantas.
- La extracción acumulada de agua por el maíz tiene una correlación significativa con las t/ha de paja, la altura de las plantas y la suma de grados días solamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; S. PEREIRA; D. RAES and M. SMITH: *Crops evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements*, 299pp., Roma, FAO, Irrigation and Drainage paper # 56, Rome, 1998.
- FEDDES, R.A.: *Water, heat and crop growth*, 184pp., **PhD thesis**, Comm. Agric. Univ., Institute of Land and Water Management Research, Wageningen, The Netherlands, 1971.
- HANKS, R. J; and, R. W. HILL: *Modeling crop response to irrigation in relation to soils, climate and salinity*, 305pp., International Irrigation Information Center, No.6, Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
- IDSO, S.B., R.J REGINATO; R.D. JACKSON; K.B. KIMBALL and F.S. NAKAYAMA: *The three stages of drying in a field soil*, pp. 831-837, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38, 1974.
- KANEMASU, E. T; R. STONE and L. POWERS: "Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum", *Agronomy Journal*, 68: 569-572, 1976.
- RITCHIE, J.T.: "Model for predicting evaporation from a crop with incomplete cover", *Water Resources Research*, 8(5): 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J. T; and S. JOHNSON: *Soil plant factors affecting evaporation*, pp. 363-390, In: B. A. Stewart, B.A and D. R. Nielsen, *Irrigation of agricultural crops*, eds; Chap. 13, Ser. 30, American Society of Agronomy, Madison, Wis, 1990.
- ZHANG, X; P. DONG and H. CHUNSHENG: "Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain", *Irrigation Science*, 21: 159-166, 2003.