

Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento

Irrigation response of sorghum in two growth seasons. Crop water production function

Felicita González Robaina¹, Julián Herrera Puebla², Teresa López Seijas² y Greco Cid Lazo²

RESUMEN. La disponibilidad del agua para la agricultura está disminuyendo rápidamente, lo que impone una utilización más eficiente de este recurso. Para lograr el incremento de la productividad del agua es imprescindible el estudio de las funciones agua rendimiento. Utilizando datos de dos experimentos realizados en la Estación de Alquizar en el sur de La Habana (suelo ferralítico rojo) y con ayuda de herramientas de análisis de regresión en este trabajo se calculan las distintas formas de expresión de la función de producción (CWPF), así como la productividad del agua (WP) para el sorgo. El modelo lineal fue el de mejor ajuste para la relación entre el rendimiento del grano de sorgo y la evapotranspiración, con un coeficiente de determinación de 0,81 y una eficiencia del agua evapotranspirada de alrededor de 6 kg de grano de sorgo por cada milímetro adicional de agua. Mientras que la función rendimiento versus agua total es de naturaleza curvilínea y se calcula usando un polinomio de segundo orden. Si se logra satisfacer en más del 80% las necesidades hídricas de este cultivo los rendimientos podrían superar los 4 000 kg/ha. Al relacionar los valores relativos de rendimiento y evapotranspiración se obtuvo una pendiente igual a 0,59, resultado que clasifica al sorgo como un cultivo de respuesta al agua entre débil y media. El factor de respuesta del rendimiento K_y para el sorgo en las condiciones de este estudio resultó igual a 0,62 e inferior al 0,9 reportado en la literatura. Por cada metro cubico de agua consumida y agua total el sorgo produce como promedio 1,15 y 0,73 kg, respectivamente. La productividad máxima se obtuvo con 3 620 m³/ha de agua total en la época de invierno.

Palabras clave: productividad del agua, déficit hídrico.

ABSTRACT. The study of the crop water production function is an important strategy to increase water productivity. Using a data base of two experiments carried out at the Station located in Alquizar at south of Havana Province (red ferralitic soils), with the help of regression tools, the different expression of the crop water production function and the water productivity (WP) of the sorghum was estimated. The lineal model was better adjustment for the relationship between evapotranspiration and grain yield for sorghum, with a coefficient of determination of 0,81 and an efficiency of 6 kg of sorghum grain for every additional millimeter of water. While the function yield versus total water is of curvilinear nature, using a polynomial of second order is calculated. If it is achieved the goal of satisfying in more than 80% water requirement of this cultivation, yields could overcome 4 000 kg/ha. When relating, relative value yields and evapotranspiration a slope equal to 0,59 was obtained, which classifies as a crop of weak and average response to water. The yield response factor of the sorghum in this study was 0,62 lower than 0,9 reported in the literature. Every cubic meter of consumed and total water used in sorghum produce as average 1,15 and 0,73 kg, respectively. The maximum productivity was obtained with 3 620 m³/ha of total water in winter.

Keywords: water productivity, deficit irrigation.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua para la agricultura está disminuyendo rápidamente, lo que impone una utilización más eficiente de este recurso para la producción de alimentos. La productividad del agua es un concepto importante para enten-

der el complejo sistema suelo planta atmósfera y diseñar buenas prácticas de conservación del agua (Koohafkan y Stewart, 2008).

Una vía estratégica importante para lograr el incremento de la productividad del agua es el estudio de las funciones agua rendimiento y su uso dentro de la planificación y dis-

Recibido 09/09/09, aprobado 12/11/10, trabajo 08/11, investigación

¹ MSc. Inv., Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Apdo. postal 6090. La Habana, Cuba, Telefax: 6911038, E-[✉](mailto:felicita@iird.cu): felicita@iird.cu

² Dr. C. Inv. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric).

tribución del agua disponible entre un grupo de cultivos en condiciones de déficit hídrico (Molden *et al.*, 2003 y Dehghanisanij *et al.*, 2009).

La función de producción agua rendimiento (CWPF) representa la relación entre el rendimiento y los diversos factores que intervienen en la producción. Trabajos experimentales realizados por diferentes autores, entre ellos los de Puech *et al.* (1976), Kallsen *et al.* (1984), Al-Jamal *et al.* (2000) y Dehghanisanij *et al.* (2009), demostraron la existencia de relaciones generalmente lineales que permiten predecir la producción a partir del consumo de agua (ET) así como la eficiencia del agua evapotranspirada.

Aunque la evapotranspiración (ET) es el parámetro hídrico que se puede asociar más directamente con la producción en el campo, el volumen de agua aplicada mediante el riego (I) es la variable independiente de mayor interés para los ingenieros, regantes y economistas agrarios. La expresión de la correlación entre producción y el agua aplicada con el riego tiene gran utilidad porque sirve para establecer el consumo óptimo desde el punto de vista económico (Stewart y Hagan, 1973, Santa Olalla y Valero, 1993).

La forma de la función y la pendiente de la misma son únicas para cada cultivo y no se pueden aplicar a otras áreas distintas de aquellas en que se han obtenido si las condiciones ambientales y de suelo, variedad utilizada y técnicas culturales aplicadas son diferentes (Santa Olalla y Valero, 1993; Al-Jamal *et al.*, 2000).

El empleo de valores relativos en las funciones de producción permite una cierta transferibilidad en términos de respuesta del cultivo al clima, ya que la ET potencial es una función de ciertas variables climáticas. Cada una de las formas de expresión de las funciones de producción nos brinda información útil a cerca de la respuesta del cultivo al agua.

El sorgo es una gramínea que por sus favorables características productivas se emplea no solo como planta forrajera para la alimentación del ganado sino también como productora de granos, por lo que en las condiciones actuales de escasez de alimentos toma importancia su estudio.

Las necesidades hídricas del sorgo varían en función del clima y de los métodos de riego. Dooroombos y Kassam (1986) reportan que para obtener rendimientos óptimos (3 500–5 500 kg/ha) para este cultivo, los requerimientos hídricos podrían variar desde 4 500 m³ hasta 6 500 m³ de agua en un sistema de riego por gravedad.

En Cuba se reportan rendimientos en suelos Ferralíticos Rojos entre 3 900 y 9 900 kg/ha (Orama *et al.*, 1998; Machado *et al.*, 2001). Mientras que Montero *et al.* (2009) en un suelo aluvial y regando por aspersión lograron rendimientos entre 4350 y 8640 kg/ha.

Pocos trabajos en Cuba han estudiado la respuesta al agua del sorgo y no se han publicado expresiones de la función agua rendimiento para las condiciones de suelo y clima del sur de La Habana.

El objetivo de este trabajo es calcular, utilizando datos de experimentos realizados en la Estación de Alquizar del antes Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje (IIRD), hoy Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAGric),

las distintas formas de expresión de la función de producción (CWPF) así como la productividad del agua (WP) del sorgo en las condiciones de la región del sur de la Habana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos de dos experimentos realizados durante las épocas de verano (junio-septiembre) e invierno (diciembre-abril) en la Estación de Alquizar del antes IIRD, hoy IAGric, localizada en el sur de La Habana (22°47'N, 82°36'W) con una altura sobre el nivel del mar de 6 m. El suelo de la estación es Ferralítico Rojo compactado (Instituto de Suelos, 1996) y el riego se aplicó por surco.

En estos dos experimentos para estudiar la respuesta del sorgo (variedad enana) al riego, se aplicaron nueve tratamientos con cuatro réplicas, donde se combinaron tres niveles de riego (límite productivo al 85% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo, al 75% y sin riego) con tres dosis de fertilización (75% kg/ha, 150% kg/ha y 225% kg/ha de urea) en un diseño experimental en bloques al azar en parcelas de 11,2 m².

Una descripción detallada del comportamiento del clima, de la humedad del suelo y los rendimientos durante los experimentos aparece en la primera parte de este trabajo publicado por Herrera *et al.* (2009).

Determinación de la función de producción agua rendimiento (CWPF)

Se determinaron las posibles relaciones con ayuda del análisis de correlación y regresión de los valores absolutos del rendimiento con las variables independientes: evapotranspiración, agua aplicada y agua total y las relaciones de los valores relativos de rendimiento (Rr) y evapotranspiración (ETr).

Se utilizó la relación entre la disminución relativa del rendimiento $(1-R/R_{\max})$ y el déficit relativo de evapotranspiración $(1-ET/ET_{\max})$ como función de producción agua rendimiento (CWPF) (Stewart *et al.*, 1977; Dooroombos y Kassam, 1986). Esta función es siempre lineal con una pendiente llamada factor de respuesta del rendimiento (K_y) si la función de producción calculada en base a la evapotranspiración es lineal (Kipkorir *et al.*, 2002).

$$\left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right) \quad (1)$$

donde: R es el rendimiento real del grano, ET la evapotranspiración real, ET_{\max} y R_{\max} la evapotranspiración y el rendimiento máximo obtenidos en el mejor tratamiento y K_y es el factor de respuesta del rendimiento.

Un factor de respuesta K_y superior a 1, indica que el cultivo tendrá grandes pérdidas en el rendimiento cuando no se satisfacen sus requerimientos hídricos. La magnitud del déficit hídrico se refiere al déficit en relación con las necesidades de agua del cultivo durante todo su ciclo vegetativo.

Para el cálculo de la productividad del agua se utilizaron las definiciones planteadas por Dehghanisanij *et al.* (2009); quienes diferenciaron la productividad del agua consumida como Et

(WP_{Et}) y la productividad del agua total aplicada (WP_T), considerando en esta última al agua aplicada como riego más la lluvia caída. En ambas definiciones el numerador fue expresado en términos de rendimiento del cultivo (kg/ha).

Con el objetivo de eliminar los valores extremos, los rangos de productividad fueron determinados para el 5 y el 95 percentil de la distribución de frecuencias de los datos experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según reportan Herrera *et al.* (2009) en la siembra de verano no hubo diferencias significativas en el rendimiento del

grano entre los tratamientos y este comportamiento se justifica por el enmascaramiento producido por las precipitaciones (582 mm). Mientras que en la siembra de invierno si hubo diferencias y el mejor resultado (4 640 kg/ha) se obtuvo con la combinación del 75% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo y una aplicación de 75 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

En invierno el sorgo consume menos y puede alcanzar rendimientos del orden de 4640 kg/ha, mientras que en verano para obtener una producción de 4 950 kg/ha consumió 4 583 m³, es decir fue necesario 1 061m³ más de agua (Tabla 1).

TABLA 1. Valores máximos observados para el sorgo en las dos épocas de siembra estudiadas de las variables: rendimiento, evapotranspiración total, norma de riego total y agua total (riego más lluvia)

| Tratamientos | Verano (junio-septiembre) (Ciclo 95 días) | | | Invierno (diciembre-abril) (Ciclo 118 días) | | | | |
|----------------------------|---|----------------------------|--|---|------------------|----------------------------|--|------------------------------------|
| | Rend. (kg/ha) | ET (m ³ /ha) | Norma Total (m ³ /ha) | Agua Total (m ³ /ha) | Rend. (kg/ha) | ET (m ³ /ha) | Norma Total (m ³ /ha) | Agua Total (m ³ /ha) |
| 85% Cc y 225 kg/ha | 4 950 | 4 583 | 1 868 | 7 688 | 4 530 | 4 127 | 2 988 | 5 788 |
| 75% Cc y 75 kg/ha | 4 560 | 4 024 | 1 593 | 7 413 | 4 640 | 3 522 | 2 107 | 4 907 |
| Solo riegos de germinación | 4 360 | 3 702 | 830 | 6 650 | 3 090 | 2 131 | 820 | 3 620 |

En general los rendimientos del sorgo oscilaron entre 3 090 y 4 950 kg/ha a los que le correspondieron valores de 820 y 1 868 m³ de agua aplicada respectivamente. El máximo rendimiento fue de 4 950 kg/ha en el verano y se obtuvo con la combinación del 85% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo y una aplicación de 225 kg/ha de fertilizante nitrogenado (Tabla 1).

En las dos épocas la ET total fue mayor que el agua aplicada como riego, y el aporte de la lluvia al consumo fue como promedio de 43,5 y 68,3% en el período seco y lluvioso respectivamente, lo que enfatiza el papel suplementario del riego en las condiciones subtropicales de la zona occidental de Cuba. Los menores valores de rendimiento coinciden con los tratamientos sin riego durante todo el ciclo de desarrollo del

cultivo. La duración del ciclo del cultivo fue inferior para el verano (95 días) donde las temperaturas promedios son superiores.

Resultados obtenidos de las funciones de producción agua rendimiento (CWPF)

En la Tabla 2 aparecen resumidas las funciones de producción encontradas para el sorgo, donde se relacionan tanto los valores absolutos del rendimiento (R) con las variables independientes: evapotranspiración (ET), agua aplicada (I) y agua total (AT), así como los valores relativos de rendimiento (Rr) y evapotranspiración (ETr).

TABLA 2. Resumen de las funciones agua rendimiento encontradas para el sorgo

| Relación | Ecuación | R ² |
|-------------------|---|----------------|
| R y ET | $R = 0,599 ET + 1 960,5$ | 0,81 |
| R y I Verano | $R = 0,381 I + 3 999$ | 0,42 |
| Invierno | $R = 0,505 I + 2 899$ | 0,73 |
| R y AT | $R = 1,189 AT - 0,000076 AT^2$ | 0,99 |
| R y ETr | $R = 2 941 ETr + 1 960,73$ | 0,98 |
| Rr y ETr | $R/R_{max} = 0,594 ET/ET_{max} + 0,396$ | 0,81 |
| Pérdida y Déficit | $(1-R/R_{max}) = 0,622 (1-ET/ET_{max})$ | 0,94 |

Análisis de las relaciones obtenidas entre rendimiento y evapotranspiración

El valor del coeficiente de correlación lineal entre el rendimiento del grano de sorgo y la ET fue alto ($r=0,9$) (Figura 1) y el modelo lineal fue el de mejor ajuste para esta relación con un coeficiente de determinación de 0,81 (Tabla 2). La pendiente de la ecuación lineal fue similar para las dos épocas estudiadas y nos muestra una eficiencia del agua evapotranspira-

da de alrededor de 6 kg de grano de sorgo por cada milímetro adicional de agua.

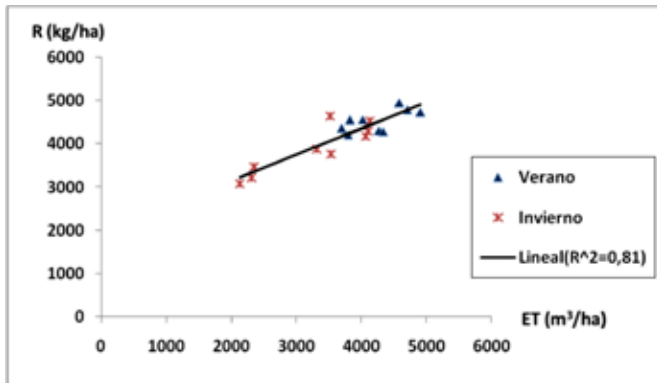


FIGURA 1. Relación entre rendimiento (R) y consumo (ET) para el sorgo en las dos épocas estudiadas.

Hanks *et al.* (1969) en ensayos de campo llevados a cabo en Colorado, EE. UU., obtuvieron una relación lineal entre la producción de grano de sorgo y la evapotranspiración, con una mayor eficiencia del agua consumida (2,08) en comparación a la obtenida en este trabajo.

Por otra parte Stewart and Steiner (1990) reportan que para el sorgo cultivado en regiones semiáridas se requieren sobre los 100 mm de evapotranspiración total antes de que se alcance rendimiento alguno y alrededor de 15,5 kg/ha de grano de sorgo pueden ser producidos por cada milímetro adicional de agua consumida (Figura 2).

cional de agua consumida (Figura 2).

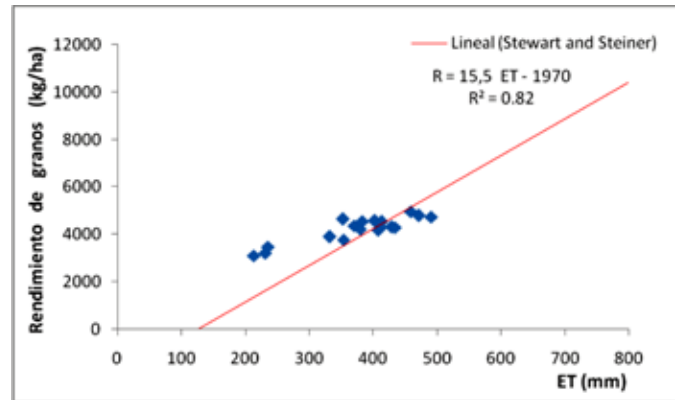


FIGURA 2. Comparación de los resultados de Stewart and Steiner (1990) para el sorgo cultivado en regiones semiáridas con los obtenidos para el sorgo en Cuba.

Si se comparan los resultados de este trabajo con la relación obtenida para el sorgo en Cuba (Figura 2) se puede apreciar primeramente que a pesar de que el rango de consumos de agua es más pequeño (200-500 mm), la predicción del rendimiento para ellos a partir de la expresión de Stewart and Steiner (1990) resulta aceptable; excepto para el rango de consumos correspondiente a los tratamientos de secano, lo que puede estar asociado a errores en el método simplificado de cálculo de los balances hídricos para la determinación de la ET.

Análisis de las relaciones rendimiento y agua aplicada

La correlación encontrada entre el rendimiento y el agua aplicada (I) fue baja, por lo que solo podemos asumir que el rendimiento de este cultivo se incrementa con el aumento del agua aplicada y que las pendientes son diferentes en cada época estudiada (Figura 3A).

En el verano el aporte de agua por riego fue inferior (830-1 868 m³) al invierno, pero se obtuvieron rendimientos superiores que variaron entre 4 210 y 4 950 kg/ha. El modelo lineal resultó el de mejor ajuste pero con un bajo R²=0,42 (Tabla2). Mientras que en el invierno los aportes de agua fueron superiores entre 820 y 3 010 m³ y el modelo lineal ajustado presenta un coeficiente de determinación de 0,73. En este modelo la pendiente es similar a la obtenida en la función de producción versus ET, lo que se explica a partir de que toda el agua aplicada es usada como ET por la planta.

Otros autores proponen una relación sigmoideal entre el rendimiento y el agua aplicada mediante el riego (Botzan, 1970; Muck y Dusek, 1971; Martín *et al.*, 1984; Santa Olalla y Valero, 1993); lo que para este estudio fue imposible determinar porque los rangos de agua aplicada no llegaron a ser aportes moderados ni excesivos, condición necesaria para obtener la curva completa.

Sin embargo, la función rendimiento versus agua total (AT) (riego+lluvias) obtenida para el sorgo en este estudio es de naturaleza curvilínea (Figura 3B) y se calcula usando un polinomio de segundo orden (Tabla 2) con un coeficiente de determinación igual a 0,997.

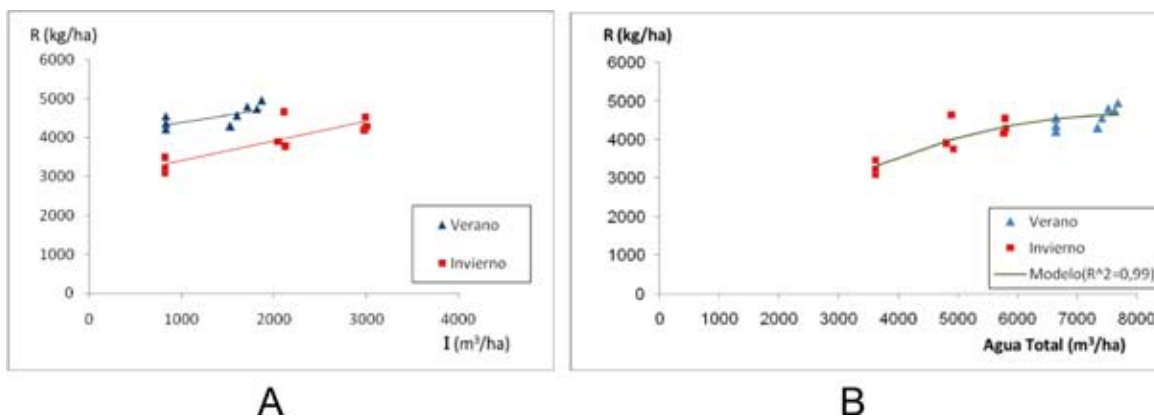


FIGURA 3. Relación entre rendimiento y A: Agua Aplicada (I), B: Agua Total (riego + lluvias) para el sorgo en las dos épocas estudiadas.

Análisis de las relaciones rendimiento y evapotranspiración relativa

Cuando la evapotranspiración relativa (ET/ET_{max}) es utilizada como variable independiente en la función de producción para el sorgo se obtiene también una relación lineal (Tabla 2) con un coeficiente de determinación alto ($R^2=0,98$) (Figura 4).

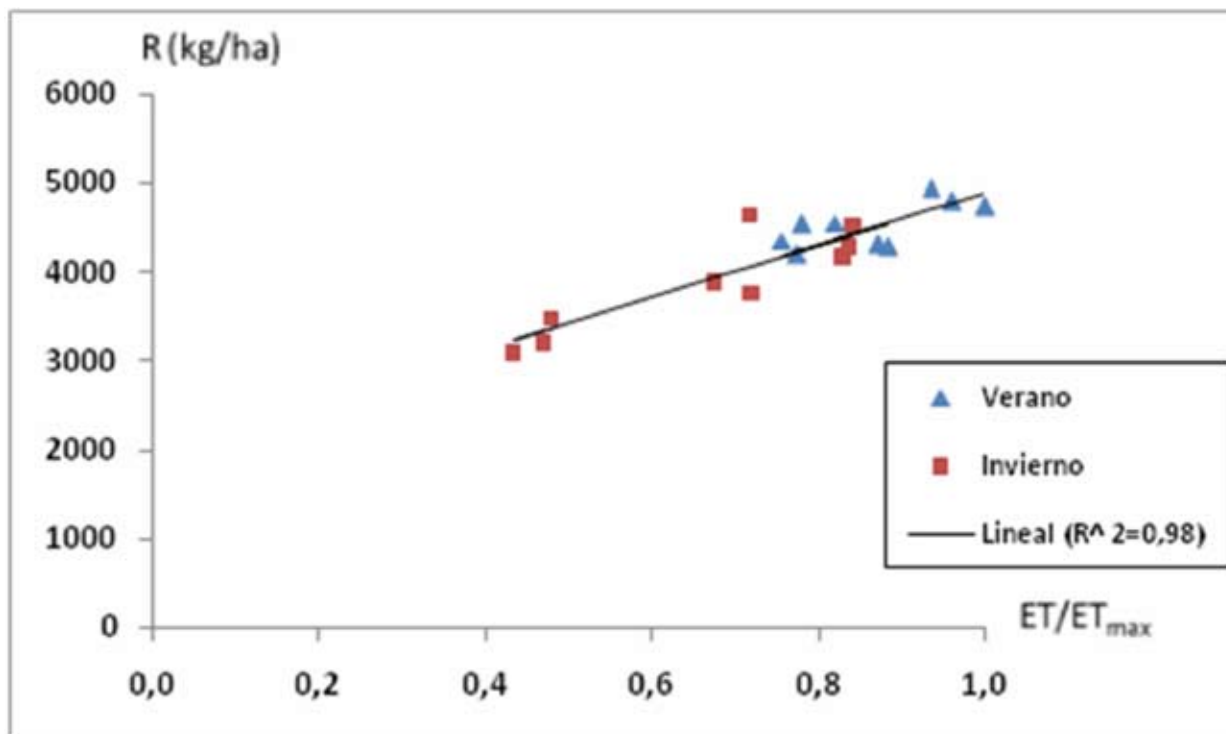


FIGURA 4. Relación obtenida entre el rendimiento del sorgo y la evapotranspiración relativa (ETr) como expresión de la tasa de satisfacción de las necesidades hídricas.

A partir de esta relación se puede inferir que para las condiciones edafoclimáticas estudiadas si se satisfacen al 100% las necesidades del sorgo a lo largo del ciclo del cultivo se puede esperar un rendimiento máximo de 4 901,73 kg/ha. Si se logra satisfacer en más del 80% las necesidades hídricas de este cultivo los rendimientos esperados podrían ser superiores a los 4 000 kg/ha.

Análisis de las relaciones rendimiento relativo y evapotranspiración relativa

Al relacionar los valores relativos de rendimiento (R/R_{max}) y de evapotranspiración (ET/ET_{max}) se obtuvo una respuesta de 0,59 que coincide con los resultados de Puech et al. (1976) y que nos permite clasificar al sorgo como un cultivo de respuesta al agua entre débil y media (Figura 5). La inversa de la respuesta al agua ($1/0,59=1,68$) constituye un índice de resistencia a la sequía. Este comportamiento indica una producción sensiblemente lineal en función del grado de satisfacción de las necesidades hídricas.

Blanchet *et al.* (1974) obtuvo en sus experiencias en Francia en la producción de grano de sorgo una respuesta al agua de 0,86; mientras que Cabelguenne (1981, citado por Santa Olalla y Valero, 1993) obtuvo una mayor respuesta (de 1,06) porque se satisfizo plenamente las necesidades hídricas a lo largo de la floración, período de mayor exigencia hídrica en este cultivo.

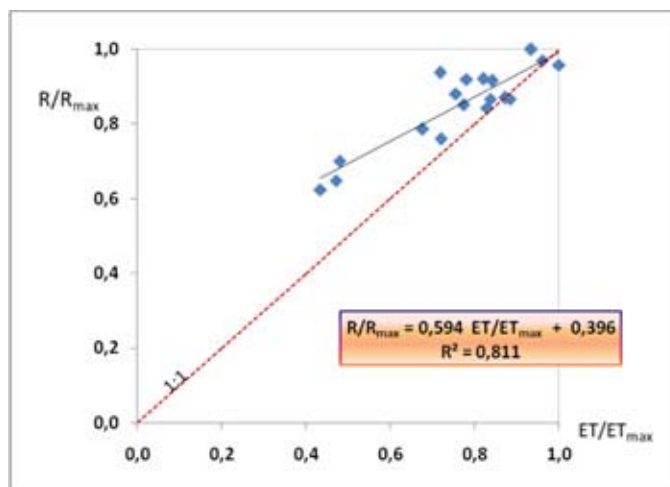


FIGURA 5. Relación entre rendimiento relativo del grano de sorgo y evapotranspiración relativa. Respuesta al agua del sorgo.

Análisis de la relación pérdida relativa de rendimiento y déficit relativo de evapotranspiración

Para estudiar la respuesta del cultivo al déficit hídrico se calculó la relación lineal entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración. La pendiente K_y en esta función de producción fue de 0,62 (Figura 6) con un coeficiente de determinación superior al 90%.

Para este estudio K_y resultó menos que proporcional al déficit hídrico (K_y inferior a 1) y menor que el 0,9 obtenido por Doorenbos y Kassam (1986), mientras que el déficit de agua varió entre 0-0,56, coincidiendo con el rango válido reportado por estos autores. Esto significa que este cultivo es tolerante al estrés hídrico por lo que las pérdidas de rendimiento esperadas no serán altas.

Estos valores de K_y sugieren que para un déficit hídrico planificado de un 25%, se puede esperar una pérdida relativa de rendimiento de un 15,5%, lo que equivale a un rendimiento máximo esperado de 439,5 kg/ha. Si el déficit se planifica de un 30% la pérdida relativa de rendimiento podría llegar a ser de un 18,7% y el rendimiento máximo esperado sería de 3987,1 kg/ha.

Kirda (2009, obtuvo para el sorgo un factor de respuesta $K_y = 0,58$ y para un déficit hídrico planificado del 25% reporta una pérdida relativa de rendimiento de un 14%.

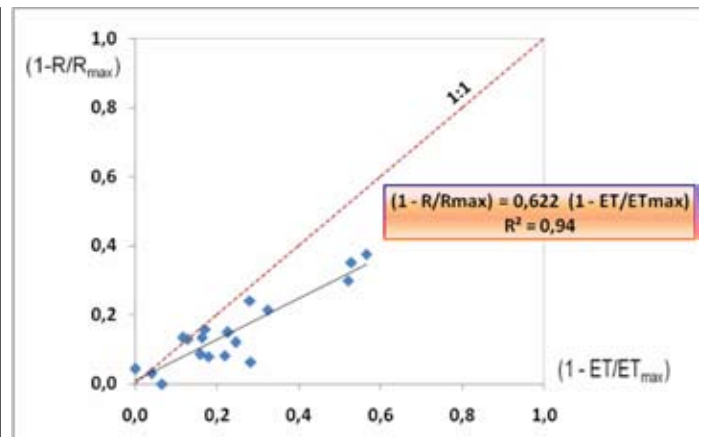


FIGURA 6. Relación entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración para el sorgo.

Resultados de la productividad del agua consumida (WP_{Et})

Los resultados obtenidos indican que por cada metro cúbico de agua consumida el sorgo produce como promedio 1,15 kg. El rango de WP_{Et} osciló entre 1,02 y 1,47 kg/m³, y fue más amplio que el 0,6-1,0 kg/m³ reportado por Doorenbos y Kassam (1986) lo que puede explicarse por las diferentes condiciones climáticas y el manejo del riego. La mayor amplitud del rango de productividad del agua consumida (WP_{Et}) indica una mayor oportunidad de aumentar la producción agrícola con menos agua.

El valor máximo de WP_{Et} fue de 1,47 kg/m³ para un consumo de 2 352 m³/ha. La mayor frecuencia de los datos se encontró entre 0,94–1.08 kg/m³ (Tabla 3).

TABLA 3. Rango de valores y estadígrafos de la productividad del agua consumida y productividad del agua total para el sorgo

| Rango de valores | Frecuencia de los datos de productividad | |
|------------------|--|------------------------------|
| | WP_{Et} (kg/m ³) | WP_T (kg/ m ³) |
| 0 – 0,56 | | 0 |
| 0,58 - 0,64 | | 6 |
| 0,64 - 0,72 | | 4 |
| 0,72 - 0,81 | | 4 |
| 0,81 - 0,89 | | 2 |
| 0,89 - 0,97 | | 2 |
| 0,8 - 0,94 | 0 | 0 |
| 0,94 - 1,08 | 8 | |
| 1,08 - 1,22 | 6 | |
| 1,22 - 1,36 | 1 | |
| 1,36 - 1,5 | 3 | |
| Rango de WP^a | 1,02 - 1,47 | 0,58 - 0,95 |
| N | 18 | 18 |
| Mínimo | 0,96 | 0,58 |
| Máximo | 1,47 | 0,96 |
| Media | 1,15 | 0,73 |
| SD | 0,16 | 0,12 |
| CV (%) | 13,7 | 16,5 |

^a Definido como el 5 y 95 percentiles del rango completo

Resultados de la productividad del agua total (WP_T)

Al utilizar en el cálculo de la productividad al agua total (WP_T) el intervalo varió entre 0,58-0,95 kg/m³ (Tabla 3). La mayor frecuencia de los datos se encontró entre 0,58-0,64 kg/m³. Por cada metro cúbico de agua total (riego+ lluvia) el sorgo produce como promedio 0,73 kg.

El máximo valor de productividad calculada en base al agua total (0,96) corresponde al tratamiento sin riego en la época de invierno (solo riego de germinación) y se obtuvo con 3 620 m³/ha de agua total (Figura 7), pproductividad del agua superior en un 33% al tratamiento donde se regó al 85% de la humedad correspondiente a la capacidad de campo. El riego deficitario usualmente tiene valores más altos de productividad que los tratamientos bajo riego durante todo el período vegetativo del cultivo (Zwart *et al.*, 2004).

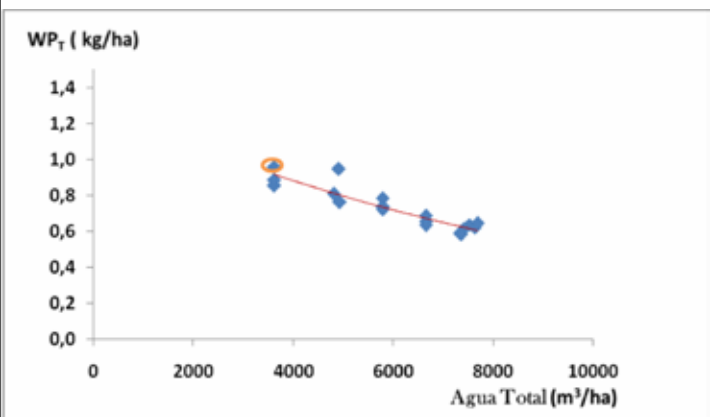


FIGURA 7. Relación entre la productividad del agua total (WP_T) y la cantidad de agua total (riego+lluvia) para el sorgo.

CONCLUSIONES

- La función de producción para el sorgo en las condiciones edafoclimáticas estudiadas resultó lineal para la relación rendimiento/evapotranspiración, mientras que para la función rendimiento/agua total se calcula usando un polinomio de segundo orden.
- Los resultados del análisis de las funciones de producción usando valores relativos mostraron que si se logra satisfacer en más del 80% las necesidades hídricas de este cultivo, los rendimientos podrían ser superiores a los 4 000 kg/ha, y que una respuesta al agua de solo 0,59 clasifica al sorgo como un cultivo de respuesta entre débil y media y con un índice de resistencia a la sequía de 1,68. Por

su parte el factor de respuesta del rendimiento K_y obtenido para este cultivo en las condiciones de estudio fue de 0,62, el cual resulta menos que proporcional al déficit hídrico e inferior a lo reportado en la literatura.

- El análisis de la productividad del agua en este cultivo bajo las condiciones de estudio muestra que por cada metro cúbico de agua consumida el sorgo produce como promedio 1,15 kg y por cada metro cúbico de agua total aplicada el sorgo produce como promedio 0,73 kg. La productividad máxima se obtuvo con 3620 m³/ha de agua total en la época de invierno y la mayor amplitud del rango de productividad del agua consumida (WP_{ET}) indica una mayor oportunidad de aumentar la producción agrícola con menos agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-JAMAL, M.S.; W. SAMMIS; M.S. BALL; D. SMEAL: "Computing the crop water production function for onion". *Agricultural Water Management*, 46: 29-41, 2000.
- BLANCHET, R.; C. MAERTENS; J.R. MARTY and J. PUECHJ.: "Principaux facteurs determinant la conduit el l'efficacité de l'irrigation". *Agrochemical*, XVIII, 3: 288'307, 1974.
- BOTZAN, M.: "Determination quantitatives de la consommation d'eau des sols irrigu s", *L'irrigazione*, 112: 3-8, 1970.
- DEHGHANISANI, H.; M. NAKHJAVANI; A. Z. TAHIRI, and H. ANYOJI: "Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions", *Irrig. and Drain*, 58: 105-115, 2009.
- DOORENBOS, J. y A.H KASSAM: *Yield response to water*, Irrigation and Drainage Paper N  33. FAO: Rome; 193 pp., 1986.
- HANSK, R. J.; R. GARDNER; L. FLORIAN: "Plant growth-evapotranspiration relations for several crop in the Central Great Plains", *Agron. J.*, 61: 31-34, 1969.
- HERRERA, P. J.; M.A. OSORIO: Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Rendimiento, 30pp., Informe t cnico, IIRD, La Habana, Cuba, 2009.
- INSTITUTO DE SUELOS, MINAG: *Nueva versi n de la Clasificaci n Genética de los Suelos de Cuba*, 102 pp., Editorial Academia, La Habana, Cuba, 1996.
- KALLSEN, C. E., W. SAMMIS and J. GREGORY: "Nitrogen and yield as related to water-use of spring barley", *Agronomy Journal*, 76(1): 59-64, 1984.
- KIRDA, C. (s.a): *Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance*. In: Deficit irrigation practices. Resources Management and Environment Department. FAO Corporate Document Repository, 10 pp, [en l nea] Disponible en: <http://www.fao.org/Consulta: 23 noviembre 2009>].
- KIPKORIR, E.C; D. RAES and B. MASSAWE: "Seasonal water production function and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya", *Agricultural Water Management*, 56(3): 229-240, 2002.
- KOOHAFKAN, P and B.A. STEWART: *Water and Cereals in Drylands*, 113pp., The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan, London-Sterling, VA, UK, 2008.
- MACHADO, A.; M. A. R. NOVELLA; O. LEYVA and E I. EXPOSITO: "Comportamiento en ocho variedades de sorgo Comportamiento en ocho variedades de sorgo (*Sorghum bicolor L.*) antes condiciones de escasos riegos", *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(4): 71-74, 2001.
- MARTIN, D. L.; D.G. WATTS and J.R. GILLEY: "Model and production function for irrigation management", *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE, 110: 149-164, 1984.
- MONTERO, L.; R. CUN; J. PÉREZ; M. RICARDO y J. HERRERA: "Riego con aguas residuales a los cultivos del sorgo y maiz como alternativa para la producción de alimento animal", *Revista Ciencias T cnicas Agropecuarias*, 18(4): 44-48, 2009.
- MOLDEN, D.; H. MURRAY-RUST; R. SAKTHIVADIVEL and I. MAKIN: *A water-productivity framework for understanding and action*, 1-18, In: Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. Wallingford/ Colombo, USA, 2003.
- MUSICK, J. T.; D.A. DUSEK: "Grain sorghum response to number, timing and size of irrigations in the Southern High Plains", *Trans. of the ASAE*, (14): 401-410, 1971.
- ORAMAS, G; M. C. TORRES; M. DÍAZ; M. SÁNCHEZ y E.RODRÍGUEZ: *Nueva colección de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench) para diferentes fines, producción de cultivos en condiciones tropicales*, 160pp., Ed. Instituto de Investigaciones Hortícolas "Liliana Dimi-trova", MINAG, La Habana, Cuba, 1998.
- PUECH, J.; J.R. MARTY; C. MARTENS: « Efficience de l'eau consomm  par divers végétaux et application de l'irrigation », *B.T.I.*, 306: 41-53, 1976.
- SANTA OLALLA MAÑAS, M y J.A.J. VALERO: Las funciones de producción versus agua. Capítulo VII. En: *Agronomía del riego*, pp. 448-519, Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España, 1993.
- STEWART, J. I. and M. HAGAN: "Functions to predict optimal irrigation programs". Proc. Am. Soc. Civ. Eng., *J. Irrig. and Drain Div, ASCE*, 99: 421-439, 1973.
- STEWART, J. I.: *Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil*. Utah Water Res. Lab., Utah State University, Logan. Pub. No. PRNG 151-1, USA, 1977.
- STEWART, B.A. and J.L. STEINER: *Water-use efficiency*, pp. 151-173, In: R.P. Singh, J.F. Parr & Stewart, B.A. eds. Dryland agriculture: strategies for sustainability, Springer Verlag, New York, USA, 1990.
- ZWART, S. J. and W.G.M. BSTIAANSEN: "Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize", *Agricultural Water Management*, 69(2): 115-133, 2004.