

MODELO DE PRODUCCIÓN DE TRIGO BAJO DÉFICIT HÍDRICO EN DOS PERÍODOS DE CRECIMIENTO

Model of Wheat Production under Different Water Depletion in Two Stages

Marco Antonio Inzunza-Ibarra^{1‡}, Ernesto Alonso Catalán-Valencia¹, Ignacio Sánchez-Cohen¹,
Magdalena Villa-Castorena¹ y Abel Román-López¹

RESUMEN

La escasa disponibilidad de agua para la agricultura en las zonas de riego del mundo y especialmente de México, causado por una demanda cada vez mayor de una población en constante aumento y aunado a la incertidumbre de las precipitaciones, obliga a realizar estudios encaminados a buscar tecnología para optimizar el uso del agua en las zonas de riego, principalmente en las áridas. Este estudio se realizó en el campo experimental del CENID-RASPA-INIFAP, ubicado en Gómez Palacio, Durango, México. El objetivo de la investigación fue determinar la función de respuesta del trigo al régimen de humedad del suelo. Los tratamientos consistieron de 13 combinaciones de la humedad del suelo expresados en tensión de humedad o potencial matricial del suelo en dos etapas fonológicas del cultivo. Los tratamientos se distribuyeron en forma aleatoria en un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. Las variables evaluadas en los tratamientos fueron rendimiento de grano, régimen de humedad edáfico e índice de área foliar. Los resultados mostraron que el cultivo alcanzó el mayor rendimiento de grano, 7.1 Mg ha⁻¹, al ser irrigado con una tensión de humedad del suelo de -0.58 y -0.33 MPa en las etapas vegetativa y reproductiva del trigo. Con la función de tipo polinomial “producción contra agua de riego” se encontró que al consumir el trigo 33.1 y 42.1 cm de agua en las etapas vegetativa y reproductiva, respectivamente, se maximiza la producción de grano. El mayor valor del índice de área foliar del trigo coincidió con el tratamiento desarrollado sin restricción de humedad edáfica.

Palabras clave: *Triticum aestivum*, potencial matricio, modelo polinomial, índice de área foliar.

SUMMARY

The scarce water available for agricultural irrigation lands of the world, especially Mexico, caused by a constantly increasing demand of a growing population, together with uncertain rainfall, makes it necessary to conduct studies that look for new technologies to optimize irrigation water use, mainly in arid lands. This study was conducted in the CENID-RASPA-INIFAP experimental station located in Gomez Palacio, Durango. The objectives were to determine models that best relate grain yield with soil water deficits and with crop water consumption. The study consisted of 13 combinations of soil moisture levels expressed as soil water potential, or matric potential, through two growth stages of wheat. Treatments were distributed in a randomized complete block experimental design with four replications. The variables evaluated through the study were grain yield, soil matric potential and leaf area index. Results showed that the highest grain yield of 7.1 Mg ha⁻¹ was obtained when the wheat was developed under -0.58 and -0.33 MPa of soil matric potential for vegetative and reproductive wheat growth stages, respectively. Using a polynomial water production function, it was found that the water consumption of 33.1 and 42.1 cm in vegetative and reproductive growth stages of wheat maximize its grain production. The highest value of leaf area index reached by this crop coincided with the treatment developed under no soil water restriction.

Index words: *Triticum aestivum*, soil matric potential, polynomial model, leaf area index.

INTRODUCCIÓN

La relación entre la producción de los cultivos y el régimen de humedad del suelo conocida como función

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). kilómetro 6+500 margen derecha canal Sacramento. 35140 Gómez Palacio, Durango, México.

[‡] Autor responsable (inzunza.marco@inifap.gob.mx)

de producción del agua de riego, es fundamental para la planificación integral del agua en la agricultura. Esta función de producción es resultado de un análisis empírico que permite maximizar el rendimiento de los cultivos con la aplicación óptima del agua de riego. Cuando no es posible aplicar la lámina de riego óptima se maximiza la productividad media del agua con una lámina de riego restringida (Kirkegaard *et al.*, 2007). Se han obtenido modelos de funciones de producción del agua de riego que han permitido optimizar la producción regional con base en el manejo eficiente del agua (Kong *et al.*, 2010). Sarwar y Bastiaanssen (2001) aplicaron el modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant, Kroes *et al.*, 2000), para investigar cómo reducir las aplicaciones de agua al trigo cuando los mantos freáticos son someros y en donde se requiere conservar el suelo en buenas condiciones hídricas (oxigenación adecuada) para que no afecte el rendimiento del cultivo. Los resultados mostraron que esto fue posible, al aplicar solo 19.5 y 32.5 cm de agua, de buena y mala calidad (3 dS m⁻¹) respectivamente. Estas funciones de producción o modelos relacionan variables climatológicas (temperatura y radiación) además del suelo (humedad), planta (etapas fenológicas) y manejo del agua (cantidad y oportunidad del riego), que son básicas para modelar la producción de cultivos. Al respecto, Irmak *et al.* (2000) y Oweis *et al.* (2000) sugirieron calcular el índice de tensión diaria, mientras que Badaruddin *et al.* (1999) propusieron la variable días críticos, que considera el período durante el cual el cultivo está sujeto a tensiones de humedad mayores que cierto valor. Asimismo, Rajput y Singh (1986) e Inzunza *et al.* (2007) utilizaron solo polinomios cuadráticos para relacionar el rendimiento observado del cultivo con el nivel de humedad al que están sujetas las plantas en cada etapa de su desarrollo. Con base en este enfoque, Chen *et al.* (2003) y López-Bellido *et al.* (2007), resumieron los resultados del efecto del déficit hídrico en las etapas fenológicas del trigo: a) el cultivo es sensible al déficit hídrico durante la formación de los órganos reproductivos y durante la floración; b) el déficit de agua en esta etapa del crecimiento reduce considerablemente el rendimiento de grano debido a la disminución en el número de granos por espiga; y, c) los tejidos de los órganos reproductivos son susceptibles al daño por falta de agua, por lo que afecta la formación de polen y en consecuencia, la fecundación. En este sentido, Li *et al.* (2010), reportaron que se obtuvo el mayor rendimiento de grano de trigo

cuando se aplicó riego en floración y en la formación del grano. En las regiones trigueras de México, la limitante no es la superficie a sembrar, sino la disponibilidad del agua de riego, por lo que se buscan tecnologías de riego que permitan incrementar la eficiencia en el uso del agua. Con este fin, Oweis *et al.* (2000), estudiaron el efecto del riego como suplemento al agua de lluvia, en la producción de grano de trigo y la eficiencia del uso de agua; concluyeron que la producción de grano se incrementó de 2.4 a 4.2 Mg ha⁻¹ y la eficiencia de uso del agua de 0.77 a 0.92 kg m⁻³ al aplicar 2/3 del total de requerimiento del riego suplementario con respecto al agua de lluvia. Sadras y Angus (2006) encontraron que la eficiencia en el uso de agua en un cultivo en Australia fue 1 kg m⁻³ en promedio. López-Bellido *et al.* (2007) obtuvieron una eficiencia en el uso del agua de 1.37 kg m⁻³ en un cultivo de trigo fertilizado con 100 kg N ha⁻¹. El objetivo de esta investigación fue encontrar un modelo de respuesta del cultivo de trigo al agua de riego que permita maximizar el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP), en Gómez Palacio (Durango, México) durante el ciclo de cultivo invierno-primavera de 2005. El sitio se localiza a 25° 35' N, 103° 27' O y altitud de 1135 m. El clima de la región se clasifica como BW(h')h w(e) que corresponde a muy árido, cálido con temperatura media anual de 22 °C y temperatura media del mes más frío de 18 °C; es extremoso con una oscilación anual de la temperatura media mensual de 7 a 14 °C. Las lluvias (25 cm año⁻¹) ocurren principalmente en verano, con lluvias invernales de apenas 5 a 10% (García, 1970). El suelo del sitio experimental pertenece a la serie Coyote, y se caracteriza por ser profundo y con textura franco arcillosa (Inzunza *et al.*, 2006).

Propiedades del Suelo Experimental

a) Físicas. Las propiedades físicas del suelo experimental (Cuadro 1) que se midieron fueron: textura (método de la pipeta de Robinson), capacidad de campo

Cuadro 1. Características físicas del suelo de los terrenos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta- Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP) ubicado en Gómez Palacio, Durango.

Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Textura	CC	PMP	Da
cm	----- % -----				----- % -----		Mg m ⁻³
0-30	38.0	38.0	24.0	Franco arcillosa	30.6	15.9	1.3
30-60	38.0	38.0	24.0	Franco arcillosa	30.0	14.7	1.2
60-90	41.4	35.4	23.2	Franca	29.3	14.4	1.3

CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; Da = densidad aparente.

y punto de marchitez permanente (método de la olla y membrana de presión), y densidad aparente (método del cilindro; Castellanos *et al.*, 2000; Richards, 1977).

b) Químicas. Se cuantificaron las principales características químicas del suelo (Cuadro 2), materia orgánica (MO, método de Walkley y Black, 1946), nitratos (Kjeldahl), fósforo (P, método de Duval, Plencassage *et al.*, 1997), potasio (K) (espectrofotometría, Plencassage *et al.*, 1997), carbonato total (volumetría, Plencassage *et al.*, 1997), conductividad eléctrica (conductimetría, extracto, Plencassage *et al.*, 1997), porcentaje de sodio intercambiable y la relación de absorción de sodio. Estas propiedades se determinaron de un promedio de seis sitios de muestreo del lote experimental, a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm), con 1 kg de tamaño de muestra compuesta por profundidad. De acuerdo con el análisis y los rangos reportados por Castellanos *et al.* (2000), el suelo muestra baja concentración de N, moderadamente baja de P, alta concentración de K, bajo contenido de sales solubles, de sodio y de MO. Con base en estos análisis de suelo se calculó la dosis de fertilización recomendada y la humedad inicial del sitio experimental.

Diseño Experimental y Factores Bajo Estudio

El cultivo se expuso a condiciones de estrés hídrico mediante el abatimiento controlado de la humedad disponible del suelo en dos períodos de desarrollo de trigo: a) vegetativa, que comprende desde la siembra del cultivo hasta inicio de floración, y b) reproductiva, va del inicio de floración a madurez fisiológica. Se seleccionaron cinco niveles de humedad del suelo, expresados como el potencial matricial o la tensión de humedad que el suelo debe alcanzar antes de la aplicación del riego siguiente: -0.05, -0.405, -0.760, -1.114, y -1.469 MPa. Los niveles de humedad se aplicaron

en cada etapa fenológica mencionada y cubren la mayor parte del rango de la humedad disponible o humedad aprovechable del suelo para la mayoría de los cultivos comerciales. La unidad experimental fue de 5 m de ancho y 10 m de largo; la parcela útil se ubicó en la parte central de la parcela experimental con el fin de eliminar el efecto de orilla. Se utilizó la variedad de trigo Anáhuac F-75; la siembra se efectuó en seco en corrugaciones, con la sembradora triguera el 23 de enero de 2005, con una densidad de siembra de 10 kg de semilla ha⁻¹. En la fertilización se utilizó la fórmula 100-50-0, la mitad N y todo el P fueron aplicados al momento de la siembra y la otra mitad del N se aplicó 30 días después de la siembra.

Ecuaciones de Tensión de Humedad del Suelo

Se determinó la relación entre el potencial matricial o tensión de humedad (T) y el contenido de humedad del suelo con base en peso seco (kg agua kg⁻¹ suelo), con la olla y la membrana de presión. Los datos se ajustaron al modelo potencial y se obtuvieron las ecuaciones de tensión de humedad del suelo (Jury *et al.*, 1991) dentro del rango de humedad aprovechable por los cultivos. Las ecuaciones ajustadas 1, 2 y 3 para las profundidades del suelo de 0-30, 30-60 y 60-90 cm, respectivamente, fueron:

$$T = -0.000183142 Ps^{-6.104} \tag{1}$$

$$T = -0.000456315 Ps^{-5.56} \tag{2}$$

$$T = -0.000428874 Ps^{-5.68} \tag{3}$$

$$R^2 = 0.98$$

donde:

T = tensión de humedad del suelo (MPa)

Ps = porcentaje de humedad del suelo

R² = coeficiente de determinación

Cuadro 2. Características químicas de los suelos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta- Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP) ubicado en Gómez Palacio, Durango.

Profundidad	Materia orgánica	NO ₃	Fósforo	Potasio	Conductividad eléctrica	CO ₃	PSI	RAS
cm	%	- - - - -	mg kg ⁻¹	- - - - -	dS m ⁻¹	- - - - -	%	- - - - -
0-30	1.08	5.5	12	1648	0.67	5.3	1.79	2.1
30-60	0.67	31.5	9	1848	1.2	6.8	1.76	2.1
60-90	0.33	11	24	1131	1.84	8.7	2.48	2.6

NO₃ = nitratos, CO₃ = carbonatos totales, PSI = porcentaje de sodio intercambiable, RAS = relación de adsorción de sodio.

Régimen de Humedad del Suelo

Durante la estación de crecimiento del cultivo se realizaron muestreos periódicos de la humedad en el perfil del suelo explorado por las raíces. Estos muestreos se hicieron con una barrena tipo Veihmeyer y un aspersor de neutrones (Troxler modelo 3222) previamente calibrado. Con esta información se determinó el momento de aplicación de los riegos. El consumo de agua por tratamiento se determinó mediante el balance hídrico en el perfil del suelo, mientras que el momento de aplicación de los riegos se determinó con base en la estimación de la tensión de humedad representativa de todo el perfil del suelo, de acuerdo con el método de Fereres *et al.* (1978) y Xie *et al.* (2005), quienes consideran la multiplicación del potencial mátrico y el consumo relativo de agua en cada estrato de suelo; esto es:

$$T_p = \sum_{i=1}^n T_i * \frac{L_{ci}}{L_{ct}} \quad (4)$$

donde:

T_p = potencial matricial ponderado en el perfil de suelo explorado por las raíces (MPa)

T_i = potencial matricial en el estrato *i* (MPa)

L_{ci} = lámina consumida en el estrato *i*

L_{ct} = lámina consumida total en el perfil de suelo explorado por las raíces

n = número de estratos con consumo de agua

Índice de Área Foliar

A las plantas muestreadas se le cortaron las hojas y se les midió el área foliar (AF) con un integrador de

área foliar (LI 3100, LI-COR); el índice de área foliar se calculó mediante la Ecuación 5 (Fageria y Santos, 2008):

$$IAF = \sum_{i=1}^n \frac{AF}{AS} \quad (5)$$

donde AS representa el área de suelo correspondiente al área foliar muestreada; AF.

Variables Respuesta

Las variables respuestas medidas fueron: rendimiento de grano (Mg ha⁻¹) e índice de área foliar (adimensional). Se registraron como variables independientes: régimen de humedad del suelo (tensión de la humedad del suelo, MPa) y la lámina de riego consumida por el trigo (cm) para cada tratamiento.

Métodos Estadísticos

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones y el diseño de tratamientos matriz cuadrado doble. Los tratamientos estudiados correspondieron a 13 combinaciones provenientes de la matriz cuadrado doble del factorial completo 5² (Martínez, 1995), las cuales realizan un muestreo estratégico de las 25 combinaciones originales, y que, por consecuencia, se logra una mayor eficiencia en el muestreo por parcela experimental. El Cuadro 3 muestra los tratamientos resultantes, que se distribuyeron en forma aleatorias en el diseño experimental citado. Además se instaló un tratamiento testigo al cual se aplicó el riego de presembrado con 20 cm de lámina de agua y cuatro riegos de auxilio de 15 cm a los 50, 75, 100 y 125 días después de la siembra, de acuerdo al manejo del riego regional.

Cuadro 3. Tensión de humedad del suelo para dos etapas de crecimiento del trigo en los tratamientos resultantes del diseño de tratamientos cuadrado doble.

Número de tratamiento	TSIF	TIFMF
	----- MPa -----	
1	-0.051	-0.051
2	-0.051	-0.760
3	-0.051	-1.469
4	-0.405	-0.405
5	-0.405	-1.114
6	-0.760	-0.051
7	-0.760	-0.760
8	-0.760	-1.469
9	-1.114	-0.405
10	-1.114	-1.114
11	-1.469	-0.051
12	-1.469	-0.760
13	-1.469	-1.469

MPa = megapascales, TSIF = tensión de humedad del suelo desde siembra a inicio de floración, TIFMF = tensión de humedad del suelo desde inicio de floración a madurez fisiológica.

Se desarrolló el análisis de varianza de las variables respuesta, así como la prueba de comparación de medias (Tukey 5%) y el análisis de regresión múltiple para obtener los modelos que relacionan las variables respuesta con el régimen de humedad del suelo. Se utilizó el programa estadístico SAS (1999) para el análisis de los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Régimen de Humedad del Suelo

El Cuadro 4 muestra el régimen de humedad del suelo en las dos etapas fenológicas estudiadas. La mayor evapotranspiración del trigo (95.1 cm), fue en el tratamiento 1 con un consumo de agua de 46.5 y 48.6 cm, para la primera y segunda etapa respectivamente. Este tratamiento se desarrolló con menor restricción de humedad en el suelo que el resto de los tratamientos, con una tensión de -0.061 y -0.051 MPa en la etapa vegetativa y reproductiva respectivamente, pero el rendimiento de grano promedio (4.8 Mg ha⁻¹) fue inferior al de mayor producción, debido a condiciones de exceso de humedad en la zona radicular del trigo. El caso contrario se presentó en el tratamiento de -1.469 -1.469 MPa, que tuvo el mayor déficit hídrico y el menor consumo de agua (45 cm) en la totalidad el ciclo

vegetativo. El mayor rendimiento de grano (7 Mg ha⁻¹) se observó en el tratamiento con -0.405 -0.405 MPa, que tuvo un consumo total de agua de 71.1 cm durante el ciclo de cultivo y un IAF medio de 3.14.

Rendimiento de Grano

El mayor rendimiento, 7.02 Mg ha⁻¹, se obtuvo con el tratamiento 4, que se desarrolló bajo un tensión hídrica del suelo de -0.456 y -0.436 MPa en la primera y segunda etapa, respectivamente con un consumo de agua en su ciclo de cultivo de 71.1 cm (Figura 1). Este tratamiento fue diferente del resto. El rendimiento de grano de trigo más bajo se observó con el tratamiento 13 con 1.1 Mg ha⁻¹, esto se debió a que bajo un estrés hídrico severo del suelo de -1.358 y -1.459 MPa en la primera y segunda etapa respectivamente, se expuso a las plantas a niveles de humedad del suelo cercanos al punto de marchitez permanente.

Además se observaron reducciones del rendimiento del trigo al desarrollarse a -0.061 y -0.051 MPa de tensión de humedad del suelo en la primera y segunda etapa y con un consumo de agua de 95.1 cm en su ciclo de cultivo. Estas condiciones correspondieron al tratamiento 1 que mostró una producción promedio de 4.8 Mg ha⁻¹ y significó una reducción de 31% con respecto al rendimiento más alto del tratamiento 4; resultados similares de 1 a 7 Mg ha⁻¹ fueron reportados por Rodríguez y Sadras (2007), en estudios con trigo realizados en Australia y de 1.16 a 7.13 Mg ha⁻¹ en áreas semiáridas de China (Huang *et al.*, 2004).

Modelo de Respuesta del Rendimiento de Trigo a la Tensión de Humedad del Suelo

Al realizar el análisis de regresión, entre el rendimiento de grano y el régimen de humedad del suelo, se encontró que el modelo polinomial de segundo grado se ajusta satisfactoriamente a los datos observados con una R² = 0.85 y un CV = 18.9% por la Ecuación 6:

$$R_g = 4.239 - 5.962T_1 - 0.980T_2 - 5.377T_1^2 - 2.308T_2^2 + 0.917T_1T_2$$

donde:

R_g = rendimiento de grano (Mg ha⁻¹)

T₁ = tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa (MPa)

T₂ = tensión de humedad del suelo en la etapa reproductiva (MPa)

Cuadro 4. Régimen de humedad del suelo registrado en los tratamientos en las dos etapas estudiadas del trigo.

Número de tratamiento	ET ₁	ET ₂	ET _T	T ₁	T ₂
	----- cm -----			----- MPa -----	
1	46.5	48.6	95.1	-0.061	-0.051
2	46.5	34.6	81.1	-0.061	-0.780
3	46.5	30.6	77.1	-0.061	-1.429
4	30.4	40.7	71.1	-0.456	-0.436
5	30.4	31.0	61.4	-0.456	-1.064
6	25.8	48.6	74.4	-0.790	-0.051
7	25.8	34.6	60.4	-0.790	-0.780
8	25.8	30.6	56.4	-0.790	-1.459
9	17.4	40.7	58.1	-1.185	-0.436
10	17.4	31.0	48.4	-1.185	-1.064
11	14.4	48.6	63.0	-1.358	-0.051
12	14.4	34.6	49.0	-1.358	-0.780
13	14.4	30.6	45.0	-1.358	-1.459

ET₁ = evapotranspiración en la etapa vegetativa, ET₂ = evapotranspiración en la etapa reproductiva, ET_T = evapotranspiración en el ciclo vegetativo, T₁ = tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa, T₂ = tensión de humedad del suelo en la etapa reproductiva.

La función ajustada resultó ser altamente significativa para el modelo así como para los coeficientes de regresión de la ecuación ajustada, por lo que las variables independientes bajo estudio explican satisfactoriamente la respuesta del trigo a variaciones

del régimen de humedad del suelo. El máximo rendimiento de grano, obtenido con el método de optimización de máximos y mínimos, se obtuvo con los valores para T₁ de -0.58 MPa y para T₂ de -0.33 MPa, lo cual corresponde a un rendimiento de 6.13 Mg ha⁻¹.

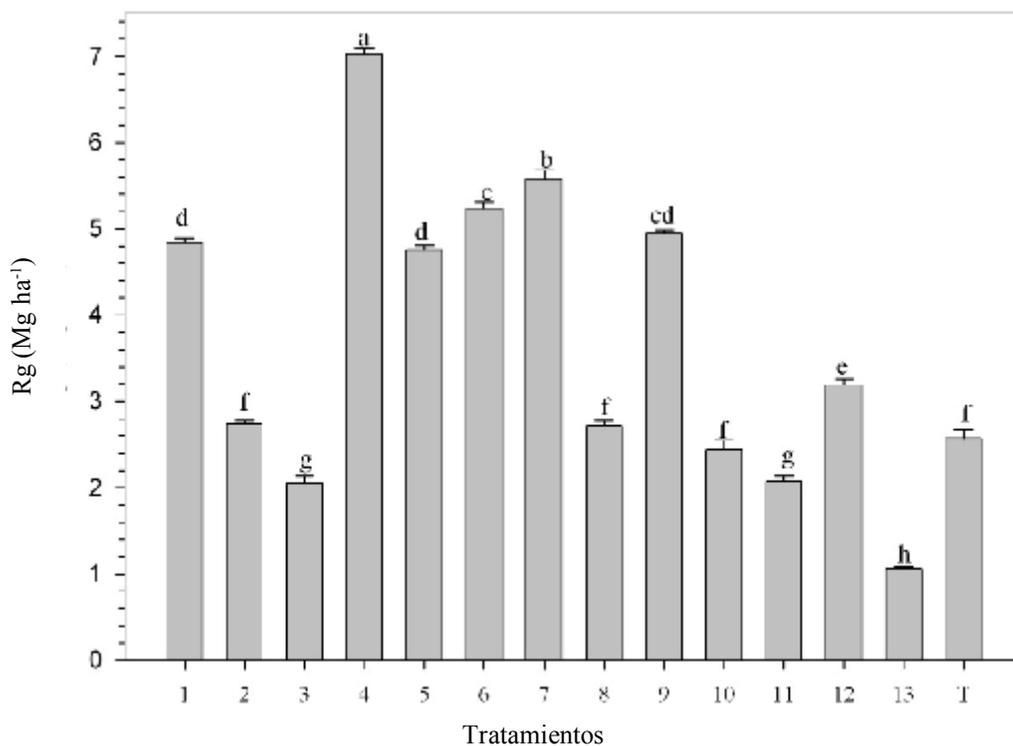


Figura 1. Rendimiento de grano (Rg) de trigo ante diferentes regímenes de riego y análisis de comparación de medias (Tukey, P < 5%).

Los resultados anteriores indican que para lograr la optimización del rendimiento del trigo en función del contenido de humedad del suelo, el riego debe aplicarse cuando la humedad en el suelo sea retenida a -0.58 MPa en la etapa vegetativa y -0.33 MPa en la reproductiva. Los valores óptimos del régimen de humedad obtenidos con base en el modelo ajustado a los datos observados, se aproximan a los valores observados del tratamiento 4 que fue el de mayor producción que, de acuerdo con el Cuadro 4, se desarrolló bajo una tensión de -0.456 y -0.436 MPa en la primera y segunda etapa de desarrollo respectivamente. El modelo obtenido presentó sensibilidad predictiva ya que fue capaz de detectar disminuciones del rendimiento de grano del trigo al desarrollarse tanto en exceso de humedad como en déficit hídricos superiores a -0.456 MPa, esto se marco más en la segunda etapa de crecimiento por lo que se concluyó que era más sensible al estrés de agua. Por el comportamiento del rendimiento de grano de tipo crecimiento y decrecimiento al uso del agua, Martínez (1995) cita este tipo de análisis como adecuado. Similares estudios fueron reportados en regiones áridas y semiáridas de China por Huang *et al.* (2004), donde reportan un rendimiento de grano de trigo de 7 Mg ha⁻¹ con un manejo oportuno de la aplicación de 65.2 mm además de 200 mm de lluvia.

Modelo del Rendimiento de Grano del Trigo en Función del Agua Consumida

Con el modelo de la Ecuación 6 es posible decidir cuándo se requiere regar y, de forma indirecta, la cantidad de riego para maximizar la producción del cultivo del trigo. En cambio, al relacionar el rendimiento de grano observado con el correspondiente consumo de agua o evapotranspiración de la primera (ET₁) y la segunda etapa (ET₂) se obtiene un modelo de producción de grano que permite optimizar el consumo de agua o evapotranspiración que el trigo debe consumir para maximizar el rendimiento de grano del cultivo para alcanzar su máximo rendimiento por unidad de superficie. Al realizar el análisis de regresión para estas variables, se obtuvo que el modelo polinomial de segundo grado explica en forma satisfactoria dicha relación (Figura 2). La función ajustada, con R² = 0.93 y CV = 13.2 % está representada por la Ecuación 7:

$$R_g = 42.423 + 0.474ET_1 + 1.982ET_2 - 0.01ET_1^2 - 0.025ET_2^2 + 0.004ET_1ET_2$$

donde:

R_g = rendimiento de grano (Mg ha⁻¹)

ET₁ = consumo de agua o evapotranspiración durante la etapa vegetativa (cm)

ET₂ = consumo de agua o evapotranspiración en la etapa reproductiva (cm)

R² = coeficiente de determinación de la regresión

CV = coeficiente de variación (%)

De acuerdo al análisis de varianza, la regresión resulta ser altamente significativa así como los coeficientes de regresión del modelo ajustado, por lo que se concluye que las variables independientes seleccionadas explican satisfactoriamente la respuesta del trigo a diferentes consumos de agua por el cultivo. Al realizar el método de optimización de acuerdo a la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral, se obtienen los valores críticos de consumo de agua, que maximizan la producción: ET₁ = 33.1 cm y ET₂ = 42.1 cm. Al sustituir estos valores en la función de producción se obtiene el rendimiento máximo esperado: R_g = 7.1 Mg ha⁻¹. La función de producción con base en el agua de riego (Ecuación 7) indica que para maximizar el rendimiento del trigo, el cultivo debe consumir o evapotranspirar 33.1 cm de agua en la primera (vegetativa) y 42.1 cm en la segunda etapa (reproductiva). Los valores óptimos de consumo del agua de riego (Figura 2), son similares a los valores observados en el tratamiento 4 que fue el de mayor producción y que evapotranspiró 30.4 y 40.7 cm de agua en la primera y segunda etapa respectivamente (Cuadro 4). Una relación similar la reportaron Sun *et al.* (2006) y Jalota *et al.* (2007) para todo el ciclo vegetativo, para un rango limitado de humedad aprovechable del suelo, y que fue de 100 a 50 cm de agua consumida, por lo que no observaron el rendimiento potencial del trigo.

Índice de Área Foliar

En la Figura 3 se muestra el índice de área foliar (IAF) por tratamiento, en ella se aprecian diferencias entre tratamientos a partir del segundo muestreo 52 días después de la siembra. En general, los tratamientos con los mayores IAF fueron los que se desarrollaron bajo condiciones no restrictivas de humedad del suelo, y los menores fueron los sometidos a déficit hídrico severo. Los tratamientos con condiciones de humedad de -0.051-0.051, -0.051-0.76 y -0.051-1.469 fueron los que mostraron los más altos IAF durante todo el desarrollo

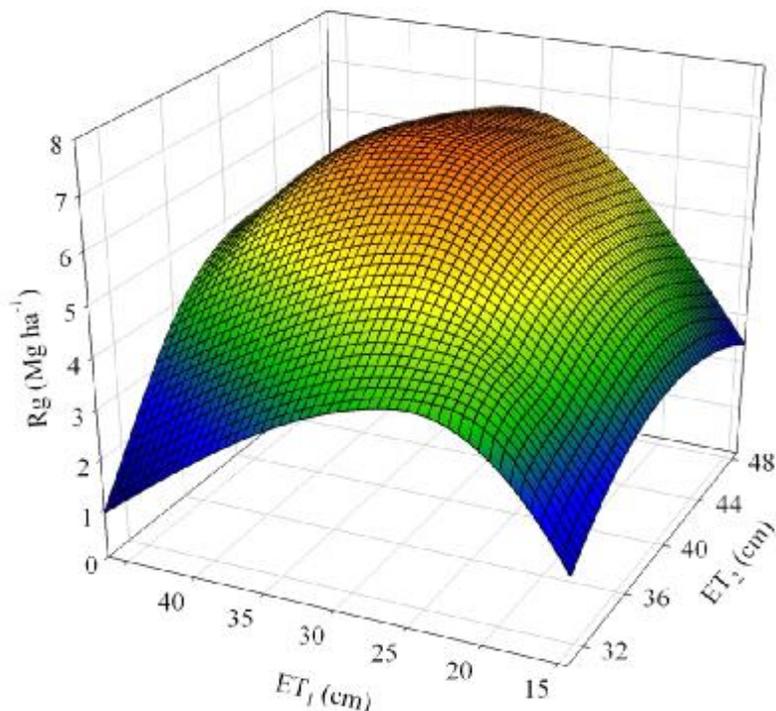


Figura 2. Rendimiento de grano (R_g) predicho por el modelo entre esta variable y la evapotranspiración real en cada tratamiento ensayado. ET_1 , ET_2 = consumo de agua por el trigo en el periodo fenológico de siembra a inicio de floración y de inicio de floración a madurez fisiológica respectivamente.

del trigo, con un IAF máximo de 11.4 a los 73 días que coincidió con el inicio de la etapa de floración. A partir de esta etapa, el IAF declinó y se registraron los menores IAF al alcanzar el trigo su madurez fisiológica, a los 123 días cuando todos los tratamientos tuvieron IAF similares.

Fue determinante someter al trigo a déficit hídricos severos en la primer etapa de desarrollo (-1.358 MPa) para IAF más bajo de 4.4 (Figura 3) en la etapa de inicio de floración cuando el cultivo tuvo la mayor cobertura vegetal. De acuerdo a estos resultados, los diferentes regímenes de humedad afectaron significativamente el crecimiento de la cobertura vegetal y el tratamiento 4 que obtuvo el mayor rendimiento presentó su más alto IAF de 8.4. Liu y Kang (2007) reportaron resultados similares, con IAF promedios para trigo de 6.5 bajo condiciones apropiadas de riego por aspersión, dato cercano al promedio de 5.1, con humedad similares en esta investigación.

CONCLUSIONES

- Los modelos que representaron la respuesta del trigo al régimen de humedad edáfico y a la evapotranspiración

fueron funciones cuadráticas, y se observaron que el rendimiento de grano disminuyó bajo condiciones deficientes como excesivas de humedad en el suelo.

- Con base en la optimización de la función de respuesta de grano del trigo al régimen de humedad en el suelo, el cultivo debe ser irrigado con -0.58 y -0.33 MPa de tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente, para maximizar el rendimiento.

- Con la función que relaciona la producción de grano con el agua de riego, se obtuvo que el trigo alcanza el rendimiento de grano máximo (7.1 Mg ha^{-1}), cuando evapotranspira 33.1 cm durante la etapa vegetativa y 42.1 cm en la etapa reproductiva, lo que indica mayor sensibilidad al estrés hídrico en esta última etapa fenológica.

- Los tratamientos de mayor rendimiento de grano no coincidieron con el mayor índice de área foliar ni con aquellos desarrollados bajo condiciones no restrictivas de humedad lo que es frecuente que suceda para cereales.

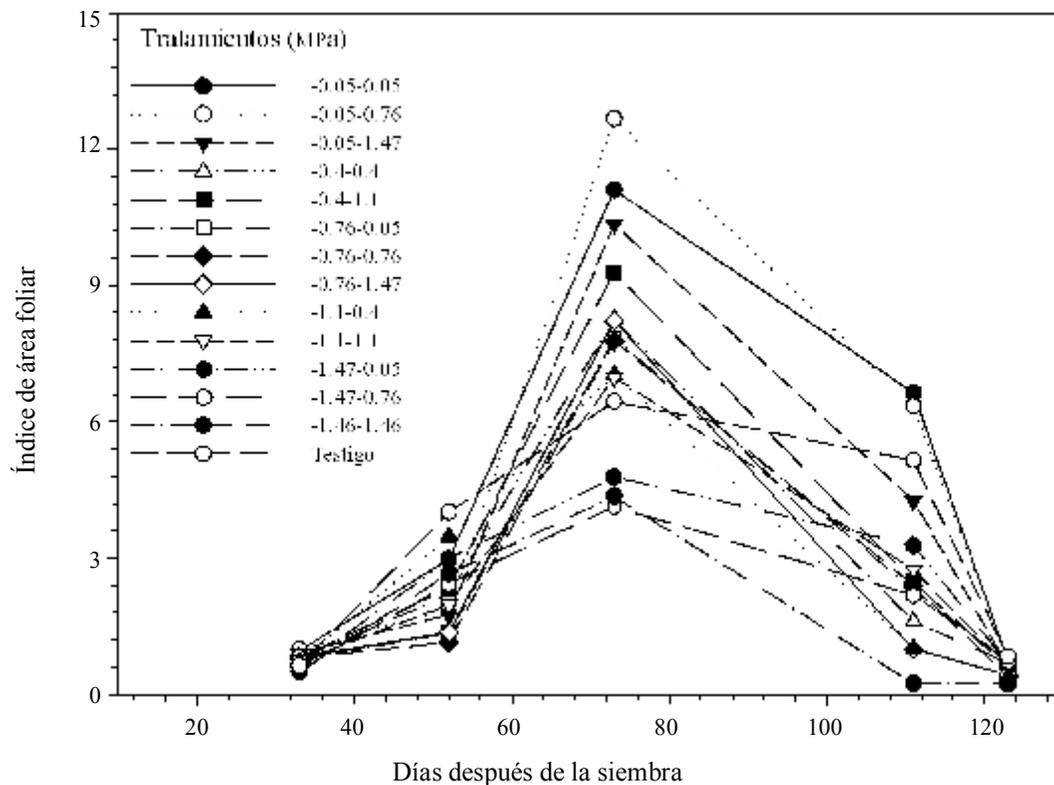


Figura 3. Índice de área foliar durante el ciclo vegetativo del trigo como resultado de la aplicación del riego en diferentes tensiones de humedad (-0.05 a -1.46 MPa) en la etapa vegetativo y reproductiva. El testigo (T) consistió de un riego de presiembra de 20 cm y cuatro riegos de auxilio de 15 cm.

LITERATURA CITADA

Badaruddin, M., M. P. Reynolds, and O. A. A. Ageeb. 1999. Wheat management in warm environments: effect of organic and inorganic fertilizers, irrigation frequency, and mulching. *Agron. J.* 91: 975-983.

Castellanos R., J., S. X. Uvalle B. y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato, México.

Chen, C., W. A. Payne, R. W. Smiley, and M. A. Stoltz. 2003. Yield and water-use efficiency of eight wheat cultivars planted on seven dates in Northeastern Oregon. *Agron. J.* 95: 836-843.

Fageria, N. K. and A. B. Santos. 2008. Yield physiology of dry bean. *J. Plant Nutr.* 31: 983-1004.

Fereres, E., E. Acevedo, D. W. Henderson, and T. C. Hsiao. 1978. Seasonal changes in water potential and turgor maintenance in sorghum and maize under water stress. *Physiol. Plant.* 44: 261-267.

García, E. 1970. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía de la UNAM. México, D. F.

Huang, M., J. Gallichand, and L. Zhong. 2004. Water-yield relationships and optimal water management for winter wheat in the Loess Plateau of China. *Irrig. Sci.* 23: 47-54.

Inzunza-Ibarra, M. A., F. Mendoza-Moreno, E. A. Catalán-Valencia, M. M. Villa-Castorena y I. Sánchez-Cohen. 2006. Respuesta de la vid a diferentes contenidos de humedad del suelo con riego por goteo. *Agrofaz* 6: 333-339.

Inzunza-Ibarra, M. A., F. Mendoza-Moreno, M. M. Villa-Castorena, E. A. Catalán-Valencia y A. Román-López. 2007. Rendimiento de grano del trigo a condiciones restringidas de humedad del suelo. *Agrofaz* 7: 25-31.

Irmak, S., D. Z. Haman, and R. Bastug. 2000. Determination of crop stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92: 1221-1227.

Jalota, S. K., A. Sood, J. D. Vitale, and R. Srinivasan. 2007. Simulated crop yields response to irrigation water and economic analysis: increasing irrigated water use efficiency in the Indian Punjab. *Agron. J.* 99: 1073-1084.

Jury, W. A., W. R. Gardner, and W. H. Gardner. 1991. Soil physics. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.

Kirkegaard, J. A., J. M. Lilley, G. N. Howe, and J. M. Graham. 2007. Impact of subsoil water use on wheat yield. *Aust. J. Agric. Res.* 58: 303-315.

Kong, L., F. Wang, B. Feng, S. Li, J. Si, and B. Zhang. 2010. A root-zone soil regime of wheat: physiological and growth responses to furrow irrigation in raised bed planting in northern China. *Agron. J.* 102: 154-162.

Kroes, J. G., J. G. Wesseling, and J. C. Van Dam. 2000. Integrated modeling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 – An overview of theory and an application. *Hydrol. Processes* 14: 1993-2002.

Li, Q., B. Dong, Y. Qiao, M. Liu, and J. Zhang. 2010. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimens applied at different growth stages in North China. *Agric. Water Manage.* 97: 1676-1682.

- Liu, H. and Y. Kang. 2007. Sprinkler irrigation scheduling of winter wheat in the North China Plain using a 20 cm standard pan. *Irrig. Sci.* 25: 149-159.
- Lloveras, J., J. Manent, J. Viudas, A. López, and P. Santiveri. 2004. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate. *Agron. J.* 96: 1258-1265.
- López-Bellido, R. J., L. López-Bellido, J. Benítez-Vega, and F. J. López-Bellido. 2007. Tillage system, preceding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop: II. Water utilization. *Agron. J.* 99: 66-72.
- Martínez G., A. 1995. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D. F.
- Oweis, T., H. Zhang, and M. Pala. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.* 92: 231-238.
- Plenecassage, A., E. Romero-Fierro y C. López-Borrego. 1997. Manual de laboratorio. Análisis de suelos y aguas. INIFAP-ORSTROM. Gómez Palacio, Durango, México.
- Rajput, G. S. and J. Singh. 1986. Water production functions for wheat under different environmental conditions. *Agric. Water Manage.* 11: 319-332.
- Richards. L. A. 1977. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D. F.
- Rodriguez, D. and V. O. Sadras. 2007. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand. *Aust. J. Agric. Res.* 58: 287-302.
- Sadras, V. O. and J. F. Angus. 2006. Benchmarking water use efficiency of rainfed wheat crops in dry environments. *Aust. J. Agric. Res.* 57: 847-856.
- Sarwar, A. and W. G. M. Bastiaanssen. 2001. Long-term effects of irrigation water conservation on crop production and environment in semiarid areas. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127: 331-338.
- SAS Institute. 1999. SAS-STAT user's guide. Version 6. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Sun, H. Y., C. M. Liu, X. Y. Zhang, Y. J. Shen, and Y. Q. Zhang. 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agric. Water Manage.* 85: 211-218.
- Walkley, A. and A. Black. 1946. A examination of the Degitjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the cromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Xie, Z, Y. Wang, and F. Li. 2005 Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China. *Agric. Water Manage.* 75: 71-83.