
Eficiencia de uso de agua en trigo (*Triticum durum* L.) en el Valle del Yaqui en un escenario de cambio climático

L. Argentel Martínez¹, J. Garatuza-Payán^{1*}, E. A. Yépez González¹, M. G. Vega Puga¹, M. A. Rivera Díaz¹ y J. M. Garibaldi Chávez¹

¹Instituto Tecnológico de Sonora. Cd. Obregón, Sonora, México

Water use efficiency in wheat (Triticum durum L.) in the Yaqui Valley under a climate change scenario.

Abstract

In the Experimental Center for Technological Transference (CETT-910) of the Instituto Tecnológico de Sonora, an experiment was carried out, under field conditions. The objective was to evaluate the water use efficiency of wheat, using as an experimental model the crystalline wheat variety CIRNO C2008. Heat was applied to the crop canopy in order to impose an increase temperature +2 °C over the control ambient temperature. The heat was generated by using thermal radiators placed over triangular equilateral structures of 5.2 m² of side. Radiators were deployed to induce experimental warming by 2°C (Warming treatment) above ambient crop canopy temperature (Control treatment) in a temperature free-air controlled enhancement, T-FACE, system. Water use efficiency was evaluated by a relationship between photosynthesis and transpiration which were measured by using a portable gas exchange measurement system (IRGA 6400). Measurements were done in well exposed leaves to sunlight when PAR was higher than 1500 μmol m⁻² s⁻¹. Such measurements were carried out during Tillering, Heading and Grain filling phenophases. The heat on crop canopy reduced the water use efficiency of CIRNO C2008 wheat variety, showing the negative effect of warming on the water regime of wheat. The increase in transpiration was the component with the greatest contribution to the water use efficiency variability of the variety used as an experimental model.

Key words: CIRNO C2008, heat, photosynthesis, transpiration.

Resumen

En el Centro Experimental de Trasferencia Tecnológica (CETT-910) del Instituto Tecnológico de Sonora se estableció un experimento en condiciones de campo para evaluar la eficiencia de uso de agua en el trigo, usando como modelo experimental la variedad de trigo cristalino CIRNO C2008 sometida al incremento de la temperatura en +2 °C por encima del dosel cultivo. El tratamiento de calor se realizó mediante radiadores térmicos ubicados en estructuras triangulares equiláteras de 5.2 m² de lado. Los radiadores se emplearon para inducir el calentamiento experimental en 2 °C por encima de la temperatura ambiente del dosel del cultivo (tratamiento de control). El control térmico se realizó mediante un sistema T-FACE, a través de una rutina proporcional, integrativa y derivativa que establecía la diferencia de +2 °C entre los tratamientos. La eficiencia de uso de agua se determinó mediante la relación entre fotosíntesis y la transpiración las que fueron medidas con un sistema portátil de medición de intercambio de gases (IRGA 6400) en hojas bien expuestas a la luz solar, cuando la radiación solar fotosintéticamente activa (PAR) fue superior a 1500 μmol m⁻² s⁻¹. Tales mediciones se realizaron en las fenofases de macollamiento, floración y llenado del grano. El tratamiento de calor sobre el dosel del cultivo redujo la eficiencia de uso de agua en la variedad de trigo CIRNO C2008, evidenciando el efecto negativo del calentamiento en las relaciones hídricas del trigo. El incremento de la

*Autores de correspondencia
Email: jaime.garatuza@itson.edu.mx

transpiración fue el componente de mayor contribución a la variabilidad de la eficiencia de uso de agua en la variedad usada como modelo experimental.

Palabras claves: CIRNO C2008, calor, fotosíntesis, transpiración.

Introducción

El agua es un recurso natural imprescindible para el desarrollo vegetal, del que cada vez se requiere un mayor consumo en los sistemas agrícolas del mundo (Lv *et al.*, 2017). La escasez de agua cada año es más fuerte y las necesidades hídricas de las plantas se incrementan por la acción combinada de otros tipos de estrés como el salino y el térmico (Argentel *et al.*, 2017). Cada año se abandona una considerable cantidad de tierras cultivables por la falta de agua ya que las especies de cultivo tradicional no toleran la condición de estrés por sequía y su rendimiento disminuye significativamente con respecto a su potencial genético productivo (Medrano *et al.*, 2017; González *et al.*, 2005).

Afortunadamente, cada vez hay más conocimientos y tecnologías disponibles que ayudan a incrementar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura (Flexas *et al.*, 2013, Markandya *et al.*, 2017). Elevar el rendimiento de un cultivo y al mismo tiempo la eficiencia de uso de agua ha sido objeto de investigación en las últimas décadas (Xue *et al.*, 2014; Turner, 2017). El carácter poligénico de la tolerancia al déficit hídrico y la amplia variabilidad de respuesta de la eficiencia de uso de agua de los cultivos básicos, incluido el trigo, han constituido una limitante fuerte para los mejoradores (Argentel *et al.*, 2016). Por ello, un paso importante es la identificación de los componentes de dicha variabilidad y evaluar la respuesta fisiológica y agronómica de las plantas ante condiciones cambiantes del clima, para recomendar variedades que muestren tolerancia.

México, por su situación geográfica posee una gran diversidad de climas y ecosistemas, sin embargo son los climas áridos y semiáridos los que ocupan el mayor porcentaje del territorio (Cavazos y Arriaga, 2012). En estas condiciones, el desarrollo de los cultivos se dificulta debido a la escasez e irregular distribución del recurso hídrico y la combinación de otros factores que ocasionan estrés a los cultivos, como el calor. Más aún, los modelos de cambio climático pronostican incrementos de la temperatura

de hasta 2°C para los próximos años (Lares *et al.*, 2016) lo que incrementará la vulnerabilidad de los cultivos. En el Valle del Yaqui, México, donde el trigo es el cultivo mayoritario y de alta demanda hídrica, se produce el 41% del trigo nacional, por lo cual pequeños incrementos en la eficiencia de uso de agua tendrían gran trascendencia económica (Bohn y Vivoni, 2017). A tono con tal problemática, se realizó una investigación en el Centro Experimental y de Transferencia de Tecnología del Instituto Tecnológico de Sonora, sitio representativo de zonas de riego en el Valle del Yaqui. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto del incremento de 2°C en la temperatura del dosel del cultivo, en la variabilidad de la eficiencia de uso de agua durante las fenofases de macollamiento, floración y el llenado del grano en el cultivo del trigo. Como modelo experimental se utilizó la variedad de trigo cristalino CIRNO C2008.

Materiales y métodos

Ubicación de área experimental

El experimento se desarrolló durante la campaña de cultivo diciembre, 2016- abril, 2017, en condiciones de campo, en el Centro Experimental de Transferencia de Tecnología (CETT-910) del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), ubicado en el Valle del Yaqui a los 27 ° 22'0.4 " N y 109 ° 54'50.6 " W (UTM: 607393.24 m E; 3027508.34 m N).

Para el aumento de la temperatura se establecieron dos tratamientos: T1: incremento de 2 °C a la temperatura del dosel del cultivo en las parcelas (tratamiento de Calor), y T2: temperatura ambiente del dosel en las parcelas de control (tratamiento de Control). Tales tratamientos fueron distribuidos siguiendo un arreglo experimental completamente aleatorio.

Para elevar la temperatura del dosel se utilizaron seis radiadores térmicos por parcela (Figura 1a) (modelo FTE-1000, 1000 W, 240 V, 245 mm de largo x 60 mm de ancho; Mor Electric Company Heating Association Inc., Comstock Park, MI, EE. UU.) (Figura 1b), los que fueron ubicados sobre

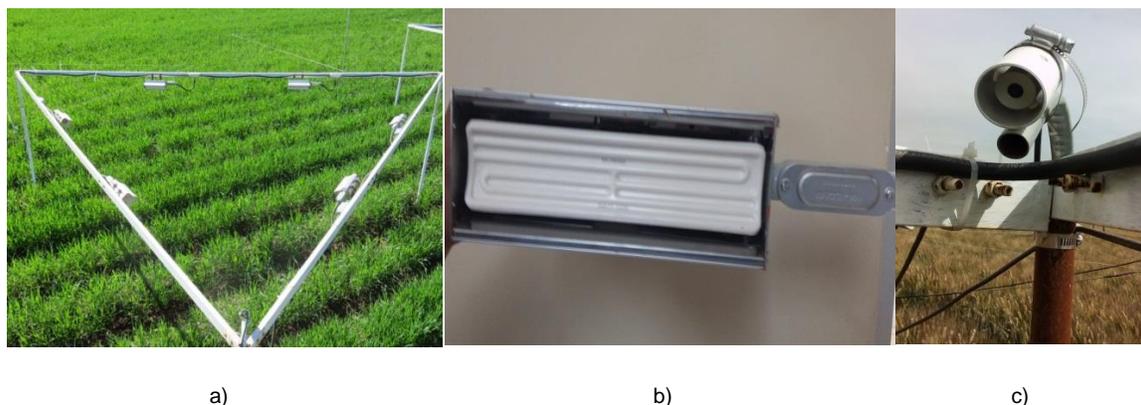


Figura 1: a) Imagen de una parcela experimental con los seis radiadores instalados, b) Imagen de uno de los radiadores térmicos y c) sensor de temperatura.

cinco estructuras triangulares equiláteras de 5.2 m de lado. Se instalaron dos radiadores en cada lado de las estructuras triangulares formando un hexágono regular que emitían calor hasta elevar la temperatura dos grados por encima de la temperatura ambiente del dosel del tratamiento Control. Para el control térmico, se instalaron sensores de temperatura infrarrojo (Figura 1c) (ITSR Apogee Instruments Inc., Logan, UT, EE. UU.) dirigidos al centro de cada superficie de cálculo, con un ángulo de inclinación de 45° desde la superficie horizontal del suelo. Los sensores ITSR se acoplaron a un registrador de datos (CR1000 Campbell Sci, Inc. Logan, UT, EE. UU.) que envía una señal de voltaje a una interfaz (MAI-05V, Instrumentos Avatar) que, a su vez, traduce la señal de voltaje a miliamperios y la envía a un regulador (Atenuador A1P-24-30-S05, Avatar Inc.). Este regulador controla la corriente enviada a los calentadores, de modo que la cantidad de calor emitido aumenta o disminuye en función de la diferencia de temperatura entre las parcelas de Calor y de Control, a través de la rutina proporcional, integrativa y derivativa descrita por Kimball, (2015).

Variedad utilizada

La variedad de trigo CIRNO C2008 se clasifica como trigo cristalino o duro (*Triticum durum* L.) que a 10 años de liberada para la producción en México y en particular en el sur de Sonora, mantiene estabilidad genética de los componentes del rendimiento de grano (Argentel *et al.*, 2018). Esta variedad se originó a partir de la selección en

poblaciones segregantes de mestizaje SOOTY-9 / RASCON-37 // CAMAYO, llevado a cabo en el Centro Internacional para la Mejora del Maíz y el Trigo (CIMMYT). CIRNO C2008 es de hábito de crecimiento invierno-primaveral y, en condiciones de riego, la madurez fisiológica se alcanza a los 122 días. El rendimiento de grano cuando la variedad fue liberada en Sonora alcanzó 5.6 t ha⁻¹ y 6.3 t ha⁻¹ con dos y tres riegos respectivamente (Figueroa-López *et al.*, 2010).

Siembra, fertilización y riegos

La siembra se realizó de manera mecanizada (con una sembradora SUB-24) el 8 de diciembre de 2016, en un suelo vertisol (Wilding *et al.*, 1983), a tres hileras en los surcos y una densidad de siembra de 170 kg ha⁻¹. La fertilización de fondo se realizó a base de 250 kg ha⁻¹ de urea + 100 kg ha⁻¹ de fertilizante de fosfato monoamónico (MAP), 11-52-00. Se realizaron tres riegos de auxilio, con una lámina de agua promedio de 14 cm y un intervalo de riego de 25 días. Esta labor estuvo precedida por aplicaciones fraccionadas del fertilizante nitrogenado durante el primero riego (fenofase de desarrollo) y segundo riego (fenofase de macollamiento) donde se aplicaron dosis de 50 kg ha⁻¹ de urea respectivamente.

Control de plagas, enfermedades y malezas

Se encontró presencia leve de áfido foliar (*Schizaphis graminum*) y se aplicó el plaguicida Muralla Max (ia. Imidacloprid + Betaciflutrin) a razón de 0.20 l ha⁻¹ en la periferia de las parcelas a una distancia de 3 m de la superficie de cálculo. El

pesticida se aplicó en la fenofase de macollamiento. La presencia ligera de malezas de hoja ancha fue controlada manualmente antes de los riegos.

Variables evaluadas:

Eficiencia de uso de agua a partir de la relación Fotosíntesis-Transpiración.

La eficiencia de uso de agua se determinó durante las fenofases de macollamiento, floración y llenado del grano mediante el cociente de la actividad fotosintética (A) y la transpiración (E) (Zhang *et al.*, 2016). Para ello se utilizó un sistema portátil (LI-6400XT, LI-COR, Inc.) que mide concentración de CO₂ y vapor de agua mediante un analizador de gases en el espectro infrarrojo (IRGA, por sus siglas en inglés). Las mediciones se realizaron en las fenofases de desarrollo, macollamiento, floración y llenado de los granos entre las 10:00 y las 13:00 hr en días soleados. Para esta medición, las tres hojas más expuestas a la radiación solar directa (3 repeticiones por planta) se insertaron, por su parte central, en la cámara de luz natural de intercambio gaseoso de 3.0 x 2.0 cm. Todas las mediciones se realizaron con una intensidad luminosa de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, y con una concentración de CO₂ de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ con un caudal de aire constante de 500 $\mu\text{mol s}^{-1}$. Las variables medidas fueron la fotosíntesis máxima (A_{max}) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y transpiración (E) ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Se determinó la eficiencia de uso de agua parcial por fenofases y la media general.

Análisis estadísticos

Para las variables evaluadas se comprobó el cumplimiento de los supuestos teóricos de homogeneidad de varianzas (Kolmogorov, 1933) y se determinaron la media y sus desviaciones estándar de un total de 15 repeticiones en cada tratamiento (tres mediciones por cada parcela). Estas fueron comparadas, mediante un análisis de varianza de clasificación doble, tomando como fuentes de variación: las fenofases (tres niveles: macollamiento, floración y llenado del grano) y el tratamiento térmico (dos niveles: Calor y Control). Estos análisis fueron basados en un modelo lineal de efectos fijos (Fisher, 1937). Cuando existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, éstos fueron comparados por la prueba de comparación múltiple de Tukey para niveles de significación del 5 y el 1% (Tukey, 1960). Se

determinaron los coeficientes de determinación R² sin ajustar para los factores aislados y la interacción entre factores, además de el coeficiente de variación y el error estándar de la media de cada variable evaluada.

Para todos los análisis se utilizó el paquete estadístico profesional ESTATISTICA, versión para Windows (StatSoft 2008).

Resultados y discusión

La eficiencia de uso de agua a nivel foliar presentó disminución altamente significativa entre las fenofases y el tratamiento, existiendo interacción altamente significativa entre estos factores. El mayor porcentaje de la variabilidad de EUA fue explicado por el efecto de la fenología (R²= 0.95). El factor tratamiento contribuyó solo en un 1% a la variabilidad total de EUA (R²= 0.01). El efecto combinado de los factores objeto de variación involucrados en el presente estudio solo contribuyó en un 4% a la variabilidad total existente en EUA (Figura 2).

La EUA tiene carácter poligénico y por tanto la variabilidad de su respuesta, ante diferentes condiciones de estrés, es amplia. Sin embargo, la principal regulación del proceso está en función del potencial hídrico y de la conductancia estomática (Sadras *et al.*, 2016). Este es un parámetro fisiológico clave que indica la capacidad de los cultivos para obtener un alto rendimiento con menor pérdida de agua (relación agua-rendimiento) (Blum 2017). La EUA ha sido propuesta como uno de los indicadores más precisos para la selección de genotipos de cultivos en áreas semiáridas con regímenes de riego deficitario (Moin *et al.*, 2016).

Existen diversas técnicas para medir la EUA a nivel de cultivo y de ecosistema, aunque son de muy difícil control, aún a escala foliar. En la actualidad, se ha logrado realizar mediciones in situ, en el campo, con equipos de medición de intercambio de gases. Una de las alternativas más prácticas ha sido la relación fotosíntesis / transpiración (A / E) (Wang *et al.*, 2016), de ahí la importancia de la medición actual.

Al analizar los componentes de la EUA se observó que los valores de la actividad fotosintética fueron significativamente superiores en el tratamiento de calor con respecto al de control (Figura 3), pero éstos no fueron suficientes para elevar la EUA,

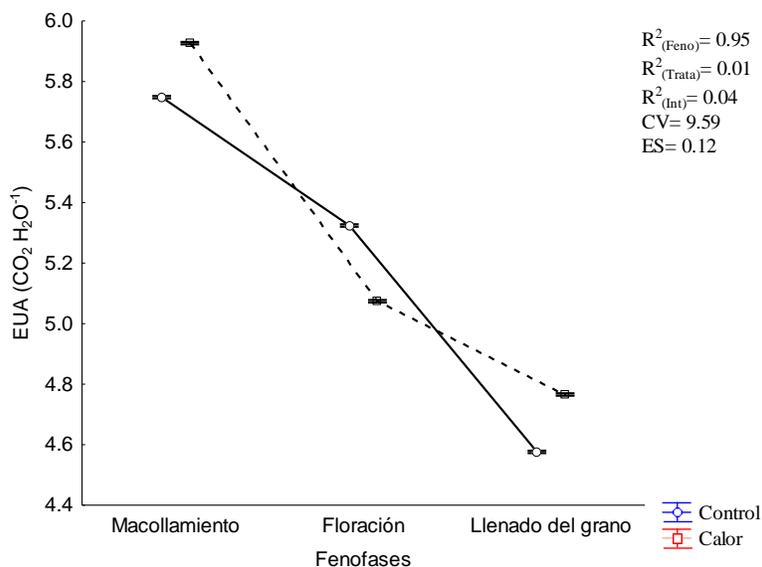


Figura 2. Eficiencia de uso de agua en las fenofases de macollamiento, floración y llenado del grano en los tratamientos de Calor y de Control. R² (Feno), R² (Trata), R² (Int): coeficientes de determinación sin ajustar para los factores fenofases, Tratamientos, y para la interacción entre factores respectivamente. CV: coeficiente de variación. ES: error estándar.

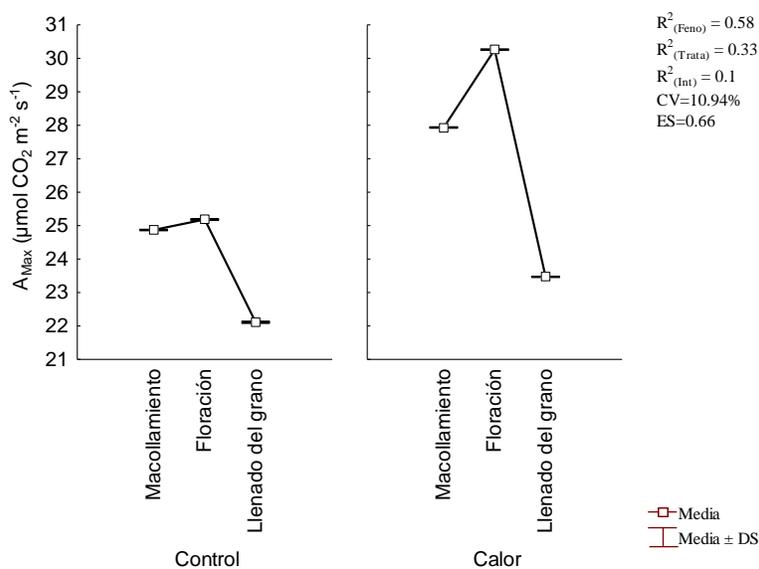


Figura 3. Fotosíntesis máxima en las fenofases de macollamiento, floración y llenado del grano en los tratamientos de Calor y de Control. R² (Feno), R² (Trata), R² (Int): coeficientes de determinación sin ajustar para los factores fenofases, Tratamientos, y para la interacción entre factores respectivamente. DS: desviación estándar. CV: coeficiente de variación. ES: error estándar.

debido a que conforme se incrementó la fotosíntesis, se incrementó también la transpiración (Figura 4). Como elemento significativo en el estudio realizado, se encontró que al pasar a la

fenofase de floración se obtuvo la mayor actividad fotosintética en ambos tratamientos, como evidencia de la capacidad de la variedad para sintetizar los precursores de macromoléculas necesarios para un

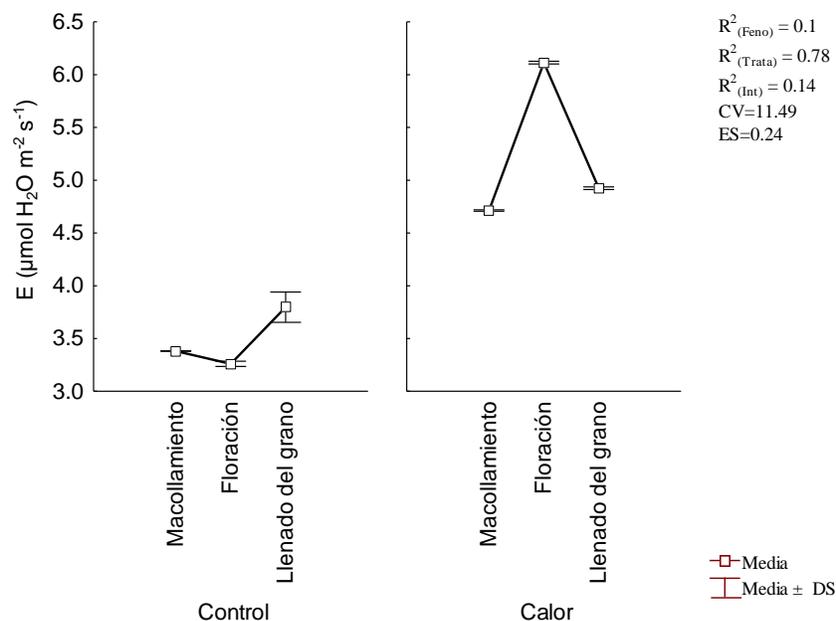


Figura 4. Transpiración en las fenofases de macollamiento, floración y llenado del grano en los tratamientos de Calor y de Control. R2 (Feno), R2 (Trata), R2 (Int): coeficientes de determinación sin ajustar para los factores fenofases, Tratamientos, y para la interacción entre factores respectivamente. DS: desviación estándar. CV: coeficiente de variación. ES: error estándar.

buen llenado del grano (Dwivedi *et al.*, 2017), debido a que después de esta fenofase la fotosíntesis disminuye dada la reducción del contenido de clorofilas y su funcionalidad (Yang, *et al.* 2016).

La reducción de la actividad fotosintética fue más pronunciada en el tratamiento de Calor (77%) evidenciado que las altas temperaturas también pueden afectar la actividad fotosintética y otros procesos de la planta indirectamente, al comprometer el estado hídrico de la planta como consecuencia del aumento de la demanda transpiratoria para la termoregulación del mesófilo (Shirdelmoghanloo *et al.* 2017).

Quizás el hecho de haberse obtenido en la etapa de llenado del grano, en el tratamiento de Calor, alta fotosíntesis con respecto al Control, es un mecanismo bioquímico desarrollado para alcanzar un buen llenado y asegurar un rendimiento próximo al potencial genético productivo de la variedad usada como modelo experimental.

En la fotosíntesis, el factor fenofases contribuyó en un 58% a la variabilidad total y la floración marcó el punto máximo de actividad. Tales resultados demuestran el declive de la actividad fotosintética y el inicio de la senescencia foliar (Flohr *et al.*, 2017),

cuando se ven favorecidos los procesos de movilización de sustancias elaboradas, más que los de síntesis (Shirdelmoghanloo *et al.* 2017). Por su parte el factor tratamiento contribuyó en un 33% a la variabilidad. Existió interacción significativa entre estos factores, y dicha interacción contribuyó solamente en un 1% a la variabilidad total existente (Figura 3). Resulta importante analizar el efecto individual de los factores involucrados en la variabilidad de respuesta de las plantas y su combinación ya que las investigaciones sobre los efectos de estreses abióticos en la actividad fotosintética del trigo, aunque son abundantes, en la mayoría de los casos divergen en los resultados, incluso bajo una misma condición de estrés. (Yang *et al.*, 2017).

En la comparación de la transpiración se obtuvo que el factor tratamiento contribuyó en un 78% a la variabilidad encontrada. Este resultado evidencia que el calor ejerce más efecto en la transpiración que en la fotosíntesis. Quizás este incremento de la transpiración sea un mecanismo fisiológico relacionado con la termoregulación del mesófilo.

El factor fenofase contribuyó solo en un 1% a la variabilidad total de la transpiración, evidenciando

que a diferentes fenofases no necesariamente se asocian diferentes valores de transpiración. El aumento de la transpiración encontrado en la fenofase de floración en el tratamiento de Calor quizás esté relacionado con una respuesta fisiológica encaminada a mantener la vitalidad del polen y evitar la malformación de granos o, en caso extremo, la desnaturalización de sus proteínas, lo que imposibilitaría la fecundación (Stratonovitch y Semenov, 2015). La interacción entre los factores fenofase- tratamiento fue altamente significativa y contribuyó en un 14% a la variabilidad total de la transpiración, atribuyendo solamente un 7% de la variabilidad al error experimental.

Mejorar la producción vegetal es compatible con la economía del agua, pero esto requiere más conocimientos y tecnologías que se deben desarrollar para hacer más sostenible la producción de alimentos y el abastecimiento de las poblaciones. En este aspecto la mejora genética tiene un importante rol y en los últimos años se han realizado múltiples trabajos que incluyen la introgresión de genes que confieren tolerancia a la escasez de agua (Prathibha *et al.*, 2015) y altas tasas de fotosíntesis (Ndour *et al.*, 2017). Por ello, el monitoreo de la respuesta del germoplasma disponible a la incidencia conjunta de factores estresantes como la salinidad y el calor, que modifican el régimen hídrico y la respuesta fisiológica y agronómica de las plantas, permitirá la selección diferencial de posibles progenitores para programas de mejora y que muestren tolerancia a los cambios pronosticados en los componentes del clima para regiones como el Valle del Yaqui, donde se estima que el trigo será la especie vegetal mayormente impactada (Blum, 2018).

Conclusiones

El tratamiento de calor sobre el dosel del cultivo redujo la eficiencia de uso de agua en la variedad de trigo CIRNO C2008. Tal resultado evidencia del efecto del cambio climático en las relaciones hídricas de cultivos de alta demanda hídrica como el trigo.

El incremento de la transpiración fue el componente de mayor contribución a la variabilidad de la eficiencia de uso de agua en la variedad usada como modelo experimental.

Referencias

- Argentel Martínez, L., Garatuzo Payán, J., Armendáriz Ontiveros, M. M., Yépez González, E. A., Arredondo Moreno, J. T., & González Aguilera, J. (2017). Estrés térmico en cultivo del trigo. Implicaciones fisiológicas, bioquímicas y agronómicas. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 57-67.
- Argentel Martínez, L., Garatuzo Payán, J., Yépez González, E. A., & de los Santos, S. (2016). Evaluación de la tolerancia de variedades mexicanas de trigo a la salinidad, a través de indicadores fisiológicos, bioquímicos y agronómicos, cultivadas en Cuba en condiciones de campo. *Cultivos Tropicales*, 37(1), 91-101.
- Blum, A. (2018). *Plant breeding for stress environments*. CRC press.
- Blum, A. 2017. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, cell & environment*, 40(1): 4-10.
- Bohn, T. J., & Vivoni, E. R. (2017). Comment on" Regional impacts of irrigation in Mexico and southwestern US on hydrometeorological fields in the North American Monsoon region", by Mahalov *et al.* (2016). *Journal of Hydrometeorology*, (2017).
- Cavazos, T. and Arriaga-Ramírez, S. (2012). Downscaled Climate change Scenarios for Baja California and the North American Monsoon during the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 25: 5904-5915.
- Dwivedi, R., Prasad, S., Jaiswal, B., Kumar, A., Tiwari, A., Patel, S., & Pandey, G. (2017). Evaluation of Wheat Genotypes (*Triticum aestivum* L.) at Grain Filling Stage for Heat Tolerance. *Int. J. Pure App. Biosci*, 5(2), 971-975.
- Figueroa, P., J. L Félix, G. Fuentes, V. Vallenzuela, G. Chávez, y J. A. Mendoza, 2010. CIRNO C-2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1: 739-744.
- Fisher, R. A. (1937). *The design of experiments*. Oliver and Boyd; Edinburgh; London.
- Flexas, J., Niinemets, Ü., Gallé, A., Barbour, M. M., Centritto, M., Diaz-Espejo, A., ... & Rosselló, F. (2013). Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynthesis research*, 117(1-3), 45-59.
- Flohr, B. M., Hunt, J. R., Kirkegaard, J. A., & Evans, J. R. (2017). Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Research*, 209, 108-119.
- González, L. M., Argentel, L., Estrada, A., Saldívar, N., & Ramírez, R. (2005). Evaluación de la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtenidos en Cuba por inducción de mutaciones. *Cultivos Tropicales*, 26(3).
- Kimball, B. A. (2015). Using canopy resistance for infrared heater control when warming open-field plots. *Agronomy Journal*, 107(3): 1105-1112.
- Kolmogorov, A.T. (1933). *Basic Concepts of Probability Theory*, Julius Springer, Berlin, 1933, 62 pp. [En Alemán].
- Lares-Orozco, M. F., Robles-Morúa, A., Yépez, E. A., & Handler, R. M. (2016). Global warming potential of intensive wheat production in the Yaqui Valley, Mexico: a resource for the design of localized mitigation strategies. *Journal of Cleaner Production*, 127, 522-532.
- Lv, Z., Liu, X., Cao, W., & Zhu, Y. (2017). A Model-Based Estimate of Regional Wheat Yield Gaps and Water Use

- Efficiency in Main Winter Wheat Production Regions of China. *Scientific reports*, 7(1), 6081.
- Markandya, A., Sahin, B., & Bao, P. N. (2017). Improving Irrigation Water Use Efficiency Holds the Key to Tackling Water Scarcity in South Asia: Technical Potential and Financing Options. *International Journal of Engineering Science*.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (43).
- Moin, M., Bakshi, A., Saha, A., Udaya Kumar, M., Reddy, A. R., Rao, K. V., & Kirti, P. B. (2016). Activation tagging in indica rice identifies ribosomal proteins as potential targets for manipulation of water-use efficiency and abiotic stress tolerance in plants. *Plant, cell & environment*, 39(11), 2440-2459.
- Ndour, A., Vadez, V., Pradal, C., & Lucas, M. (2017). Virtual plants need water too: Functional-structural root system models in the context of drought tolerance breeding. *Frontiers in plant science*, 8, 1577.
- Prathibha, M. D., Rajanna, M. P., & Sheshshayee, M. S. (2015). Marker Assisted Introgression of Water Use Efficiency (WUE) and Root Traits by Novel Multi-parent Backcross Breeding Strategy (MABC) in Rice (*Oryza sativa* L.). *ecialise Sp*, 49(2), 296-298.
- Sadras, V. O., Villalobos, F. J., Orgaz, F., & Fereres, E. (2016). Effects of Water Stress on Crop Production. p. 189-204. In: Francisco J. Villalobos, Elias Fereres, eds. *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. Springer International Publishing. USA.
- Shirdelmoghanloo, H., Cozzolino, D., Lohraseb, I., & Collins, N. (2016). Truncation of grain filling in wheat (*Triticum aestivum*) triggered by a brief heat stress during early grain filling-association with senescence responses and reductions in stem reserves. *Functional Plant Biology*.
- StatSoft (2008). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com
- Stratonovitch, P., & Semenov, M. A. (2015). Heat tolerance around flowering in wheat identified as a key trait for increased yield potential in Europe under climate change. *Journal of experimental botany*. erv070.
- Tukey, J. W. (1960). A survey of sampling from contaminated distributions. p. 448-485. In: Ingram Olkin, ed. *Contribution to probability and statistics: Essays in honor to Harold Hotelling*. Stanford University Press. USA.
- Turner, N. C. (2017). Comments on the special issue of FASE on 'Agriculture in Water-Limited Areas'. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 4(2), 254-255.
- Wang, B., Zhang, Y., Hao, B., Xu, X., Zhao, Z., Wang, Z., & Xue, Q. (2016). Grain Yield and Water Use Efficiency in Extremely-Late Sown Winter Wheat Cultivars under Two Irrigation Regimes in the North China Plain. *PLoS one*, 11(4), e0153695.
- Wilding, Larry P., Neil E. Smeck, and G. F. Hall. (1983). *Pedogenesis and soil taxonomy: the soil orders*. Elsevier. USA.
- Xue, Q., Rudd, J. C., Liu, S., Jessup, K. E., Devkota, R. N., & Mahano, J. R. (2014). Yield determination and water-use efficiency of wheat under water-limited conditions in the US Southern High Plains. *Crop Science*, 54(1), 34-47.
- Yang, X., Lu, Y., Ding, Y., Yin, X., Raza, S., & Tong, Y. A. (2017). Optimising nitrogen fertilization: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014). *Field Crops Research*, 206, 1-10.
- Yang, X., Tian, Z., Sun, L., Chen, B., Tubiello, F. N., & Xu, Y. (2017). The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China. *Climatic Change*, 1-16.