

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRRECCION DE POSTGRADO



PROGRAMACIÓN DE RIEGO UTILIZANDO UN ÍNDICE TÉRMICO Y SU
EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL MAIZ (*Zea mays* L.)

Tesis

Que presenta José Antonio Morales de la Cruz

Como requisito parcial para tener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRUDUCCION

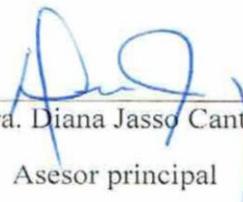
Saltillo, Coahuila

Diciembre de 2017

PROGRAMACIÓN DE RIEGO UTILIZANDO UN ÍNDICE TÉRMICO Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL MAIZ (*Zea mays* L.)

Tesis

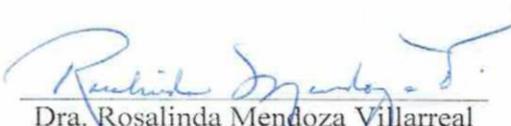
Elaborado por JOSÉ ANTONIO MORALES DE LA CRUZ como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesores


Dra. Diana Jasso Cantú
Asesor principal


Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla
Asesor


Dr. Homero Ramírez Rodríguez
Asesor


Dr. Raúl Rodríguez García
Asesor


Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Subdirectora de Postgrado
UAAAN

Agradecimiento

A Dios por darme salud

A la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y cumplir una meta más en mi vida.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico durante mis estudios de postgrado.

A mi asesora principal Dra. Diana Jasso Cantú por todo el apoyo que me brindo para la realización de esta investigación, al Dr. Raúl Rodríguez García por el apoyo brindado y consejos, al Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla, y al Dr. Homero Ramírez Rodríguez, por todo el interés que mostraron para realizar este trabajo de investigación.

A los trabajadores de campo Lorenzo Villa Sandoval y a Juan José Valenzuela Cabrera, por haberme ayudado a sacar adelante el trabajo realizado en campo y laboratorio. Al personal de laboratorio de Fitoquímica, María Guadalupe Moreno Esquivel, María Leticia Rodríguez González y Olga Leticia Solís Hernández. Al personal de laboratorio de aguas residuales, Biol. Silvia Guerrero Martínez y a la Lic. Ma. Del Socorro Mireles Vázquez por el apoyo en la realización de los análisis de suelo, así como a la T.L.Q. Josefina de la Cruz responsable del laboratorio de RASPA.

Dedicatoria

A mi hermano (+)

Juan Carlos Morales de la Cruz.

INDICE GENERAL

Agradecimiento	iii
Dedicatoria	iv
Lista de figuras	vii
Lista de cuadros.....	viii
Resumen	ix
Abstract	xi
Introducción	1
Revisión de literatura	2
Estrés hídrico en la planta	2
Impacto del estrés hídrico en componentes del rendimiento	2
Índice de área foliar.....	2
Materia seca total	2
Rendimiento de grano	3
Índices para detectar estrés hídrico	3
Riego deficitario controlado.....	3
Potencial hídrico foliar.....	3
Fluctuación del diámetro de tronco y de fruto	3
Flujo de savia	4
Conductancia estomática.....	4
Temperatura del dosel vegetal	4
Teoría del índice de estrés hídrico en la planta (CWSI)	5
CWSI.....	5
Materiales y métodos	8
Localización del experimento	8
Tratamientos a evaluar	8
Diseño experimental.....	10
Medición del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	10
Muestreo de suelo para calcular lámina de riego	10
Características Físico -Químicas del suelo	11

Manejo del experimento.....	11
Evaluación de tratamientos	12
Análisis estadístico.....	13
Resultados y discusión	14
Evolución del CWSI y del CHS durante el ciclo del cultivo	14
Relación del CWSI en función del CHS	16
Evolución en el tiempo del Índice de Área Foliar.....	18
Evolución en el tiempo de materia seca total.....	18
Peso de 100 granos y rendimiento de grano	19
Conclusión	22
Referencia	23

Lista de figuras

Figura 1. Límite superior e inferior del CWSI, (T_h-T_a) en función del DPV.	9
Figura 2. Evolución del CWSI durante el ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).....	15
Figura 3. Contenido de humedad en el suelo (CHS) durante del ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).....	16
Figura 4. Evolución del CWSI en los diferentes tratamientos en relación con el CHS (% , v/v). T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).	17
Figura 5. Evolución en el tiempo del Índice de Área Foliar.	18
Figura 6. Evolución en el tiempo de la materia seca total.	19
Figura 7. Rendimiento de grano de maíz en función del valor medio de CWSI en la etapa reproductiva.	21

Lista de cuadros

Cuadro 1. Valores de CWSI programados para efectuar los riegos en dos etapas de desarrollo en el cultivo de maíz variedad ASGROW 7573.	9
Cuadro 2. Propiedades Físico-químicas del suelo.	11
Cuadro 3. Comparación de medias del peso de 100 granos y rendimiento de grano en los tratamientos.....	20

Resumen

PROGRAMACIÓN DE RIEGO UTILIZANDO UN ÍNDICE TÉRMICO Y SU EFECTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL MAIZ (*Zea mays* L.)

POR

JOSÉ ANTONIO MORALES DE LA CRUZ

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCION
UNIVERSIDAD AUNTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DRA. DIANA JASSO CANTÚ.- ASESOR

Saltillo, Coahuila

Diciembre de 2017

La temperatura de las hojas de un cultivo medida con un termómetro infrarrojo u otros sensores remotos de este tipo, proporcionan un medio para detectar el estado hídrico en los cultivos. Es un método ideal porque no es destructivo, las mediciones son a distancia, y pueden ser escaladas de plantas individuales a campos enteros, pueden hacerse mediciones continuas y ser menos costosas que otros métodos alternativos. El índice térmico CropWater Stress Index(CWSI) fue desarrollado para ser utilizado con la termometría infrarroja para detectar diferentes niveles de estrés hídrico y programar los riegos. Esta técnica ha sido poco utilizada en México, siendo una alternativa para monitorear los cultivos en forma extensiva. El objetivo de la investigación fue evaluar diferentes niveles del CWSI y su efecto sobre el crecimiento y el rendimiento en el maíz var. Asgrow 7573. Los riegos se programaron a valores predeterminados de CWSI en las etapa vegetativa (V) y reproductiva (R): T1 = 0.25V-0.25R; T2 = 0.50V-0.35R; T3 = 0.75V-0.5R; T4 = 0.75V-0.60R; T5 = 0.75V-0.75R. Se sembró el 17 de junio de 2016 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. El CWSI se determinó diariamente a mediodía solar. La evaluación de los tratamientos consistió en la medición del índice de área foliar (IAF) y la materia seca total (MST), el rendimiento de grano (RG) y los componentes de rendimiento de grano (CRG). Los análisis estadísticos mostraron diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los tratamientos. En el menor valor del CWSI se obtuvo la mayor MST ($T1 = 26,815 \text{ Kg ha}^{-1}$) y RG ($T1 = 11,596 \text{ kg ha}^{-1}$) y en el valor de mayor índice la menor MST ($T3 = 19635 \text{ Kg ha}^{-1}$) y RG ($T3 = 9062.7 \text{ kg ha}^{-1}$). El CWSI puede ser una valiosa herramienta para monitorear el estado hídrico y programar el riego en maíz.

Palabras clave: CWSI, Crecimiento, Rendimiento, Var. Asgrow 7573, maíz

Abstract

**PROGRAMMING OF IRRIGATION USING A THERMAL INDEX AND ITS
EFFECT ON MAIZE GROWTH AND PERFORMANCE (ZEA MAYS L.)**

BY

JOSÉ ANTONIO MORALES DE LA CRUZ

MASTER IN SCIENCE IN ENGINEERING IN PRDUCTION SYSTEMS
UNIVERSITY AUNTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DRA. DIANA JASSO CANTÚ.- ASESOR

Saltillo, Coahuila

December 2017

The temperature of the leaves of a crop measured with an infrared thermometer or other such remote sensors provide a means for detecting the water status in the crops. It is an ideal method because it is not destructive, the measurements are remote, and can be scaled from individual plants to whole fields, can be made continuous measurements and be less expensive than other alternative methods. The Crop Water Stress Index (CWSI) was developed to be used with infrared thermometry to detect different levels of water stress and to program irrigation. This technique has been little used in Mexico, being an alternative to monitor the crops extensively. The objective of the research was to evaluate different levels of CWSI and their effect on growth and yield in var. Asgrow 7573. Irrigations were programmed to CWSI values in the vegetative (V) and reproductive (R) stages: T1 = 0.25V-0.25R; T2 = 0.50V-0.35R; T3 = 0.75V-0.5R; T4 = 0.75V-0.60R; T5 = 0.75V-0.75R. It was planted on June 17, 2016 at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, in Saltillo, Coahuila, under a random block design with four replicates. The CWSI was determined daily at solar noon. The evaluation of treatments consisted in the measurement of leaf area index (LAI) and total dry matter (MST), grain yield (GR) and grain yield components (CRG). Statistical analyzes showed a significant difference ($p < 0.05$) between treatments. In the lower value of the CWSI, the highest MST (T1 = 26,815 Kg ha⁻¹) and RG (T1 = 11,596 kg ha⁻¹) were obtained and the lowest MST (T3 = 19635 Kg ha⁻¹) and RG (T3 = 9062.7 kg ha⁻¹). CWSI can be a valuable tool for monitoring water status and scheduling irrigation in maize.

Keywords: CWSI, Growth, Yield, Var. Asgrow 7573, corn

Introducción

Los impactos potenciales del Cambio Climático Global (CCG) en las zonas áridas y semiáridas afectan la disponibilidad del agua, ante este problema es necesario lograr un equilibrio entre el uso del agua y el rendimiento de los cultivos, para lograrlo se requiere un conocimiento amplio de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico (EH). Investigaciones sobre el tema se han efectuado para evaluar los índices tradicionales de estrés hídrico. Se han implementado una serie de de indicadores para medir o estimar el estrés hídrico en la planta algunos de estos son: el contenido de agua en el suelo, potencial hídrico del tallo, contenido de agua de los tejido, conductancia estomática y sensores de flujo de savia, mediciones de cambio en el diámetro de órganos, estas mediciones son efectuadas en suelo y planta. La medición o estimación de estos indicadores requieren de mucho tiempo y proporcionan mediciones puntuales en una sola ubicación del suelo, hoja, rama o árbol, lo que no permite representar el estado hídrico de una superficie extensa. El método “Índice de Estrés Hídrico en la Planta” (Crop Water Stress Index; CWSI) fue desarrollado por Idso *et al.* (1981) permite medir el estado hídrico en la planta o cultivo por medio de detección térmica, monitorear gran superficie de cultivo mediante termómetros infrarrojos portátiles y puede utilizarse de forma remota, es un método ideal para el control de estrés, debido a que es un método no es destructivo.

Está técnica para detectar el estrés hídrico y programar riego ha sido poco investigada en México, (Lopez *et al.*, 2009), también se está promoviendo la utilización de vehículos no tripulados con fines de detección del estrés y estado fisiológico de la planta. Por lo anterior se requiere efectuar los estudios de campo que permitan determinar la relación del índice con variables fisiológicas del cultivo bajo diferentes niveles de estrés hídrico. En este contexto el interés de esta investigación es utilizar el CWSI para monitorear el riego en el cultivo de maíz y determinar la respuesta del cultivo a diferentes niveles de estrés hídrico con la finalidad de disponer de una técnica que sea segura, confiable y que pueda escalarse a superficies mayores

Revisión de literatura

Estrés hídrico en la planta

En la primera etapa del cultivo el 100% de agua se pierde por evaporación directa del suelo, con el desarrollo del cultivo el área foliar cubre totalmente el suelo y la transpiración se convierte en el principal proceso, perdiendo el 90% de agua por este proceso y solamente un 10% se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et al.*, 2006). Se ha encontrado que el estrés hídrico acelera o demora la fenología, dependiendo del cultivo y del momento e intensidad del estrés hídrico, la fenología acelerada es un mecanismo adaptativo común para escapar de la sequía en algunos cultivos (Ferreira *et al.*, 2007 y Farré *et al.*, 2006).

Impacto del estrés hídrico en componentes del rendimiento

Índice de área foliar

La determinación del área foliar es fundamental en estudios de crecimiento vegetal, lo cual permite estimar la capacidad fotosintética y puede ayudar a entender la relación entre la acumulación de biomasa de las plantas, lo cual depende a su vez, de la tasa de absorción de nutrientes, edad de la planta, condiciones meteorológicas, así como del nivel de rendimiento Bugarín *et al.*, (2002). El Índice de área foliar (IAF) después de floración disminuye por la senescencia de las hojas viejas que se aceleran por el estrés hídrico, determinar la relación entre IAF y rendimiento de grano, es una herramienta útil para el desarrollo de los cultivos (Gheysari *et al.*, 2017, Farré *et al.*, 2009).

Materia seca total

La etapa más sensible al estrés hídrico se presenta en la floración, con reducción en la biomasa (Farré *et al.*, 2009). La integración del estrés hídrico a corto plazo ocasiona pérdidas sobre la acumulación de MST, así mismos retarda floración y madurez en el maíz (Çakir, 2004)

Rendimiento de grano

El estrés hídrico afecta la tasa de germinación de la semilla y longitud de la radícula. El éxito en el crecimiento y producción de rendimiento también dependen de esta etapa (Khayatnezhad *et al.*, 2010). Omitir el riego en la etapa de floración impacta severamente en el rendimiento, en comparación con suprimir el riego en la etapa vegetativa o llenado de grano (Igbadun *et al.*, 2006). El estrés hídrico afecta la etapa reproductiva principalmente en el peso de granos por lo tanto las características fisiológicas asociadas con la capacidad de mantener el peso de grano bajo estrés hídrico debe ser prioridad (Mansouri-Far *et al.*, 2010).

Índices para detectar estrés hídrico

Riego deficitario controlado

El riego deficitario controlado (RDC) es una técnica de riego que contempla la fenología del cultivo y su capacidad para resistir situaciones de déficit hídrico. Permite someter al cultivo a un estrés moderado durante sus etapas de crecimiento menos sensibles. El RDC es utilizado como una medida para reducir el agua de riego cuando es limitado por sequía u otros. Esta técnica logra equilibrio entre el uso del agua y el rendimiento de los cultivos (Geerts *et al.*, 2009 y Fereres *et al.*, 2007).

Potencial hídrico foliar

El potencial hídrico foliar se ha utilizado como un indicador fisiológico para caracterizar el estado hídrico de la planta. Los factores que influyen en la medición del potencial hídrico foliar son: ubicación de la hoja dentro de la planta con respecto a la luz solar y posición de la hoja en el tallo. Los patrones de respuesta al estrés hídrico son la demanda evaporativa de la atmósfera y la edad de la planta (Gálvez *et al.*, 2012)

Fluctuación del diámetro de tronco y de fruto

La evolución del diámetro de un órgano vegetal presenta dos componentes, una asociada al crecimiento del órgano y otra a la pérdida de agua. Las variaciones del diámetro del tallo reflejan la adición de cuatro componentes: crecimiento radial irreversible, deshidratación / rehidratación reversible de células vivas, expansión térmica,

contracción, y la expansión de los elementos conductores muertos debido al aumento y relajación de las tensiones internas (Ortuño *et al.*, 2010).

Flujo de savia

Este indicador del estado hídrico de la planta está asociado a la absorción de agua por la planta y es la medida del flujo de savia. Presenta una evolución típica a lo largo del día, alcanzando el valor máximo al mediodía cuando la radiación es máxima y un mínimo durante la noche. El flujo de savia varía con respecto a la disponibilidad de agua, también la respuesta del flujo de savia se pronuncia más en el tallo que en las ramas (De Schepper *et al.*, 2010).

Conductancia estomática

La conductancia estomática depende de la luz, la temperatura y la concentración de CO₂ intercelular a través de la fotosíntesis y sobre el potencial hídrico de las hojas. La conductancia estomática (gs) y la transpiración (E) a menudo se correlacionan positivamente con la conductancia hidráulica del continuo suelo-hoja (ks-l). La interacción entre gs y ks-l ayuda a regular el potencial hídrico (Ψ) de las hojas. Cuando el Ψ del suelo y la planta disminuyen durante el estrés hídrico, ks-l disminuye. La disminución de ks-l de la planta, amplifica el efecto del estrés hídrico en las hojas y aumenta la sensibilidad de la respuesta estomática a la sequía. El aumento de la sensibilidad estomática puede promover la supervivencia a la sequía (Tuzet *et al.*, 2003)

Temperatura del dosel vegetal

Los factores ambientales que afectan el flujo de energía entre el dosel y su entorno son: radiación solar y térmica, temperatura del aire, déficit de presión de vapor y velocidad del viento. Las propiedades básicas de la planta, como la absorción de radiación, coeficiente de convección y la resistencia a la difusión del vapor de agua, determinan hasta qué punto el ambiente influyen en el contenido energético y la temperatura del dosel. El resultado de dicho balance es la energía almacenada por la hoja en forma de productos fotosintéticos y temperatura de la hoja (Gates 1964).

Teoría del índice de estrés hídrico en la planta (CWSI)

Los trabajos pioneros de Gates (1964) mostraron que la temperatura de la hoja (hojas, follaje, dosel) es un indicador de estrés hídrico en la planta. La transpiración es un proceso que disipa parte de la energía solar absorbida por las hojas y regula su temperatura. La planta bajo estrés hídrico cierra los estomas y la transpiración se reduce, disminuyendo la disipación de la energía solar absorbida, lo cual provoca un incremento de temperatura de las hojas, por el contrario las plantas sin estrés hídrico tendrán menor temperatura. Idso et al. (1981) y Jackson et al. (1981) definieron el índice térmico llamado Crop Water Stress Index (CWSI), el cual es determinado midiendo valores diarios de diferencia de temperatura entre la hoja y el aire sobre el cultivo $(T_h - T_a)_x$, y lo relacionan entre dos límites térmicos, uno de no estrés o límite inferior $(T_h - T_a)_{LI}$ y uno de máximo estrés $(T_h - T_a)_{LS}$. El rango de valores es 0 a 1, donde 0 es no estrés y 1 máximo estrés (Idso *et al.*, 1982). Las mediciones de T_h se realizan utilizando radio termómetros (termómetro infrarrojo) o fotografía infrarroja, conociéndose a esta técnica como termometría infrarroja (Jackson *et al.*, 1981).

CWSI

El monitoreo del estrés hídrico de los cultivos bajo riego es fundamental para optimizar los rendimientos, para llevar a cabo esta acción se requiere un alto número de sensores para la supervisión continua del estado hídrico del suelo y los cultivos (Playan *et al.*, 2014). La termometría infrarroja es un método ideal para controlar el estrés, debido a que no es un método no destructivo, las mediciones de temperatura de la hoja se hacen a distancia, y pueden ser escaladas de plantas individuales a campos enteros, se pueden hacer mediciones continuas y ser menos costosas que otros métodos alternativos (Nayak, 2005). Investigaciones han sido efectuadas para evaluar la aplicación del CWSI para programar los riegos en diferentes cultivos y lugares del mundo. En Colorado, USA, Alderfasi y Nielsen, (2001) utilizaron este índice para programar riego en trigo y monitorear el estado hídrico de la planta; en Turquía Orta *et al.*, (2003) lo implementaron en melón, Cremona *et al.* (2004) en colinabo, Erdem *et al.* (2006a y b) en frijol y papa y Erdem *et al.* (2010) en brócoli. En este mismo cultivo Sezen *et al.*

(2014) evaluaron el índice para programar riego en pimiento morrón bajo riego por surcos y goteo.

La aplicación del CWSI en maíz ha sido el tema de numerosos estudios recientes, Chen *et al.* (2010), evalúan para programar el riego en maíz, índices de intensidad y grado de sequía del suelo y el CWSI, determinando que los dos índices de suelo deben complementarse con el CWSI para programar el riego. Irmak *et al.* (2000) en la región Mediterránea de Turquía, evaluaron tres niveles de abatimiento de la humedad disponible del suelo en maíz y comprobaron la capacidad del CWSI para detectar en la planta las variaciones en el contenido de agua en el suelo. En la India Kar y Kumar (2010) determinan el CWSI en diferentes etapas críticas del maíz de invierno, para investigar si la programación de riego basado en la fenología puede ser optimizado con el índice. En China Li *et al.* (2010) evaluaron la utilidad del CWSI para cuantificar el estrés hídrico en trigo y maíz, comparándolo con mediciones de flujos de calor latente y de dióxido de carbono. Payero e Irmak (2006) evaluaron la utilización de líneas base superior e inferior dinámicas, para calcular el CWSI en maíz y soya, la línea base inferior (no estrés) fue determinada en función del déficit de la altura de la cubierta, presión de vapor del aire, radiación solar y velocidad del viento, el límite superior (máximo estrés) está en función de la radiación solar y la velocidad del viento. Los autores citan que las nuevas líneas base facilitan la aplicación del CWSI como herramienta para programar los riegos.

En estudios recientes se han utilizado los sistemas de riego de movimiento lineal o pivote central para instalar termómetro infrarrojo para efectuar mediciones de temperatura del follaje, obteniendo una exploración más dinámica del estado hídrico de las plantas (O'Shaughnessy *et al.*, 2012b; Peters and Evett, 2008). También se han utilizado cámaras infrarrojas de imagen térmica montadas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) para cuantificar el estrés hídrico (Bellvert *et al.*, 2013), también para detectar los cambios fisiológicos en un olivar provocados por *Verticilium* (Calderón *et al.*, 2013).

Esta técnica para detectar el estrés hídrico y programar riego ha sido poco investigada en México, (Lopez *et al.* 2009), también se está promoviendo la utilización de vehículos no tripulados con fines de detección del estrés y estado fisiológico de la planta. Por lo

anterior se requiere efectuar los estudios de campo que permitan determinar la relación del índice con variables fisiológicas del cultivo bajo diferentes niveles de estrés hídrico. En este contexto el interés de esta investigación es utilizar el CWSI para monitorear el riego en el cultivo de maíz y determinar la respuesta del cultivo a diferentes niveles de estrés hídrico con la finalidad de disponer de una técnica que sea segura, confiable y que pueda escalarse a mayores superficies.

Materiales y Métodos

Localización del experimento

El presente estudio se ubicó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila México, cuyas coordenadas geográficas son: 25°21'14" N, 101°02'08" O, a una altitud de 1743 msnm.

Tratamientos a evaluar

Se programó evaluar la aplicación del riego en 5 niveles predeterminados del CWSI (Tabla 1) en las diferentes etapas vegetativa que cubrieran un rango de menor estrés (CWSI = 0.25) a mayor estrés (CWSI = 0.70). El índice se obtuvo con la siguiente ecuación (Idso *et al.*, 1981; Jackson *et al.*, 1981).

$$CWSI = \frac{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_x}{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_{Ls}} \quad (1)$$

Dónde:

CWSI= Índice de estrés hídrico del cultivo.

T_h = Temperatura de las hojas o dosel (°C).

T_a = Temperatura del aire (°C).

$(T_h - T_a)_{Li}$ = Límite inferior de no estrés hídrico (°C).

$(T_h - T_a)_{Ls}$ = Límite superior de máximo estrés hídrico (°C).

$(T_h - T_a)_x$ = Diferencia de temperatura medida diariamente (°C).

El valor diario del $(T_h - T_a)_{Li}$ se calcula con la ecuación de regresión obtenida experimentalmente por Idso *et al.* (1981), y la cual ha sido utilizada por De Jonge *et al.* (2015), siendo la sig:

$$(T_h - T_a)_{Li} = a - b \text{ DPV.}$$

En la figura 1 se muestra $(T_h - T_a)$ en función del DPV

Dónde:

a = Intercepto (3.11) de relación lineal que ha sido obtenida previamente para el maíz.

b = Pendiente (-1.9) de relación lineal que ha sido obtenida previamente.

$DPV = \text{déficit de presión de vapor de agua (KPa)} = DPV = (e^{\circ}_{\text{aire}} - e_{\text{aire}})$

$e^{\circ}_{\text{aire}} = \text{Presión del vapor de agua a saturación (KPa)}$

$e_{\text{aire}} = \text{Presión parcial del vapor de agua (KPa)}$.

El valor de $(T_h - T_a)_{Ls}$ se calcula para el valor de temperatura del aire al momento de la medición, de acuerdo al procedimiento recomendado por Idso *et al.* (1981), cuando se obtiene la siguiente igualdad:

$GPV = DPV$

Dónde:

$GPV = \text{gradiente de presión de vapor entre hoja y el aire} = GPV = (e^{\circ}_{\text{hoja}} - e^{\circ}_{\text{aire}})$.

$e^{\circ}_{\text{hoja}} = \text{presión de vapor a saturación en la hoja (estomas) (KPa)}$.

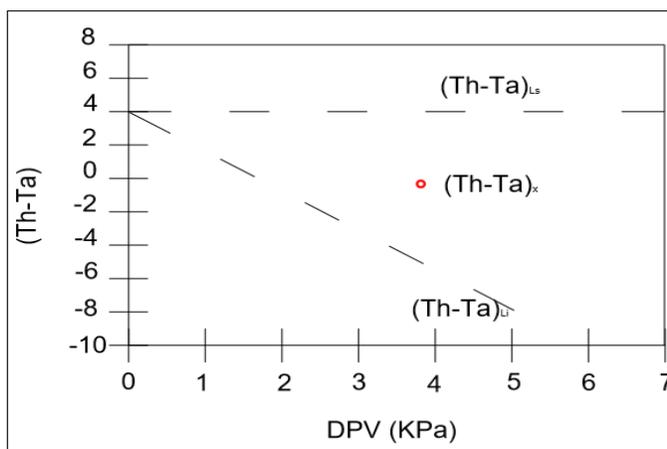


Figura 1. Límite superior e inferior del CWSI, $(T_h - T_a)$ en función del DPV.

Cuadro 1. Valores de CWSI programados para efectuar los riegos en dos etapas de desarrollo en el cultivo de maíz variedad ASGROW 7573.

Tratamiento	Etapas	
	Vegetativa	Reproductiva
	CWSI	CWSI
T1	0.25	0.25
T2	0.50	0.35
T3	0.50	0.50
T4	0.70	0.60

T5	0.70	0.70
----	------	------

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Cada tratamiento se estableció en una parcela con dimensión 9.6 * 30 m, cada parcela fue dividida en cuatro repeticiones de 9.6 * 7.5 m. La siembra se realizó el 17 de junio de 2016, la variedad sembrada fue ASGROW 7573, con separación entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 0.2 m, la densidad de población fue de 62,500 plantas/ha. Previo a la siembra se efectuó la preparación del terreno con barbecho y un paso de rastra, se efectuó el riego de pre-siembra el 11 de junio

Medición del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).

Las mediciones de la temperatura de la hoja (hojas o dosel) se iniciaron a partir de los 35 días después de la siembra (DDS), entre las 12:00-13:00 hora local, periodo del día, en que se detectan las mayores diferencias del índice debido al estrés hídrico (Taghvaeian *et al.* 2012). Inicialmente la medición se efectuó en plantas individuales debido a que en esa etapa el cultivo no tenía cobertura completa, se utilizó un termómetro infrarrojo manual (marca EXTECH Instruments). Se hicieron 16 mediciones por parcela (dos mediciones por repetición), visando las plantas del centro de la parcela. La temperatura del aire y humedad relativa se midieron al mismo tiempo con un higo-termómetro digital (modelo EA25), estos valores fueron utilizados para calcular el DPV. Cuando la planta tenía 60 dds, las mediciones de temperatura de la hoja se realizaron con un termómetro infrarrojo Apogee (modelo MI-230), el sensor se colocó a un metro sobre el dosel, a un ángulo de 45° para visar únicamente las hojas del centro de la parcela, la emisividad del sensor fue de 0.95 (Zia *et al.* 2011) y el error de medición es de ± 0.4 °C. El tiempo de medición de todos los tratamientos fue de 20 minutos.

Muestreo de suelo para calcular lámina de riego

Se realizaron muestreos a una profundidad de 0 – 80 cm (estratos de 20 cm), para determinar el contenido de agua mediante el método gravimétrico. La cantidad de agua

que se aplicó en cada riego fue la necesaria para llevar a capacidad de campo el perfil de 0 - 80 cm de profundidad, el requerimiento de riego se calculó con la siguiente ecuación.

$$Lr = \frac{(\theta_{vcc} - \theta_{vx})}{100} x prf. \quad (2)$$

Donde Lr= lamina de riego (cm); θ_{vcc} = contenido de humedad a capacidad de campo (% , v/v); θ_{vx} = contenido de humedad en el día de muestreo x (% , v/v); prf. = profundidad del suelo (cm).

Características Físico -Químicas del suelo

Antes de establecer el cultivo, se obtuvieron muestras de suelo por estratos de 20 cm hasta 80 cm de profundidad, para efectuar análisis físico-químico de las muestras, los cuales se realizaron en el Laboratorio de Aguas Residuales, del Departamento de Riego y Drenaje de la UAAAN. Las propiedades físico – químicas del suelo se muestran en la tabla 2.

Manejo del experimento

Los riegos fueron suministrados mediante un sistema de riego por aspersión, la velocidad de precipitación promedio (V_p) fue de 1 cm / hora. La dosis de fertilización aportada fue de 253-44-33 (N – P – K en Kg ha⁻¹). Antes del riego de presiembra se aportó la dosis 54 – 44 – 22, a los 41 días después de la siembra (DDS) 132 – 0 – 11 y a los 66 DDS 67 – 0 – 0 (N – P- K en kg ha⁻¹)

Cuadro 2. Propiedades Físico-químicas del suelo.

	Estrato del suelo (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Ph	8.04	8.06	8.17	7.99
C.E. (Ds/m)	1.26	1.39	1.33	1.09
Materia orgánica (%)	2.11	2.01	1.58	1.82

Nitrógeno (%)	0.1	0.09	0.08	0.09
Fósforo (%)	53.8	54.3	43.2	38.2
Potasio (%)	611	333	201.6	208.3
Carbonatos totales (%)	54.8	54.8	54.4	53.9
Arcilla (%)	30.2	31.4	31.7	32.9
Limo (%)	21.7	19.7	20.6	21.0
Arena (%)	48	48.8	47.6	46.1
CC (%. v/v)	27.6	26.8	25.7	24.9
PMP (%. v/v)	15.4	14.8	14.0	13.4

Evaluación de tratamientos

Las variables evaluadas del efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento del cultivo fueron: índice de área foliar (IAF), materia seca total (MST), rendimiento de grano (RG) y componentes del rendimiento de grano (CRG).

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron nueve muestreos de plantas, se cosecharon 16 plantas por tratamiento (cuatro plantas por repetición). En el laboratorio se separaron hoja y tallo. Se determinó el área de las hojas siguiendo el procedimiento recomendado por Tanaka y Yamaguchi (1984), midiendo el largo y ancho de las hojas y su producto multiplicado por el factor de corrección 0.75, para después calcular el IAF. Posteriormente hojas y tallos se colocaron en una estufa de secado a una temperatura de 65°C durante 96 horas, para obtener el peso seco y calcular el rendimiento en kg ha⁻¹. Para obtener RG y CRG, se cosecharon 40 plantas por repetición (parcela útil fue de 25.6 m²). Las mazorcas se secaron por 15 días en un área protegida de la lluvia con techo transparente, después fueron desgranadas y pesado el grano. A continuación se tomó una muestra de 5 mazorcas por repetición, se contabilizó el número de granos por mazorca, después se tomó una submuestra de 100 granos para determinar el peso seco de grano y corregir a peso seco el grano de la repetición, posteriormente se calculó el rendimiento en ton ha⁻¹.

Análisis estadístico

La respuesta de rendimiento a los tratamientos fue analizada por análisis de varianza (ANVA). Cuando el ANVA identificó efectos en los tratamientos se realizó la prueba de Tukey ($p < 0.05$). El análisis de datos se llevó a cabo utilizando el paquete estadístico SAS 9.0.

Resultados y Discusión

Evolución del CWSI y del CHS durante el ciclo del cultivo

Se programó evaluar la aplicación del riego en cinco niveles predeterminados del CWSI en las etapas vegetativa y reproductiva que cubrieran un rango de menor a mayor estrés hídrico. En la etapa vegetativa, en el periodo del inicio de las mediciones de los 35 DDS al día 50 DDS, el tratamiento T1 recibió dos riegos y los otros cuatro tratamientos un solo riego (figura 1), el contenido de humedad en el suelo (CHS) antes de cada riego fue de: T1= 22.02% y 20.90 %, T2= 22.48%, T3= 21.02%, T4= 21.18%, T5= 18.29% , que corresponden a los valores de humedad disponible antes del riego entre un 60% y 40% como se muestra en la figura 2. Los índices en el periodo de 60 a 110 DDS (de la fase V12 a R2), fluctuaron de 0 a 0.10 en todos los tratamientos, esto se debió a que en este periodo hubo precipitaciones (200.4 mm), que mantuvieron alto el contenido de humedad en el suelo en todos los tratamientos (figura 2), que promovieron que la planta se desarrollara en condiciones óptimas de no estrés hídrico. En el período de 110 a 145 (de la fase R2 a R5), el valor del índice se incrementó en los tratamientos debido a al efecto combinado de demanda hídrica de la atmósfera y el déficit progresivo de agua en el suelo, los tratamientos se diferenciaron durante la etapa reproductiva.

El tratamiento T1 recibió dos riegos y los otros cuatro tratamientos un solo riego (fig. 1), el contenido de humedad en el suelo antes de cada riego fue de: T1= 24.2% y 18.8%, T2= 18.5%, T3= 17.5%, T4= 16.9%, T5= 15.9 %, los valores de HDS antes del riego fluctuaron de un 80% en T1 a un 10% en T5 (fig. 2), los tratamientos más estresados alcanzaron valores cercanos a PMP.

Agam *et al.* (2013) mencionan que la cobertura de nubes reduce instantáneamente la radiación neta y energía disponible alterando el balance energético de la superficie, la radiación de onda corta disminuye y altera la temperatura de la copa de la planta. De Jonge *et al.* (2015) Mencionan que bajo estrés hídrico en un día soleado, ventoso y seco, los cultivos se marchitan y el CWSI estaría bien representado, Maes *et al.* (2012) mencionan que la temperatura de la hoja está influenciada por la altura y estructura del dosel.

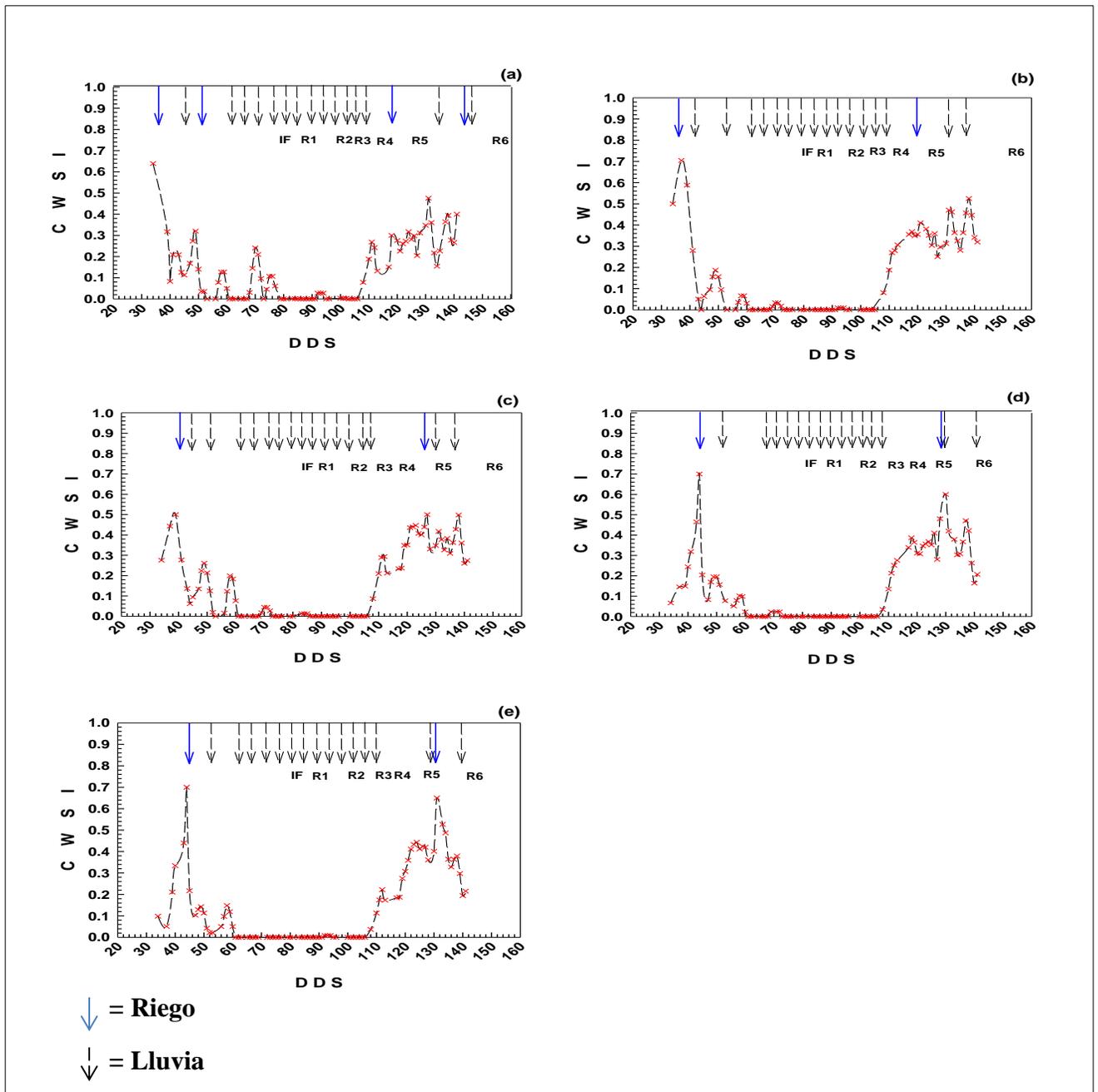


Figura 2. Evolución del CWSI durante el ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).

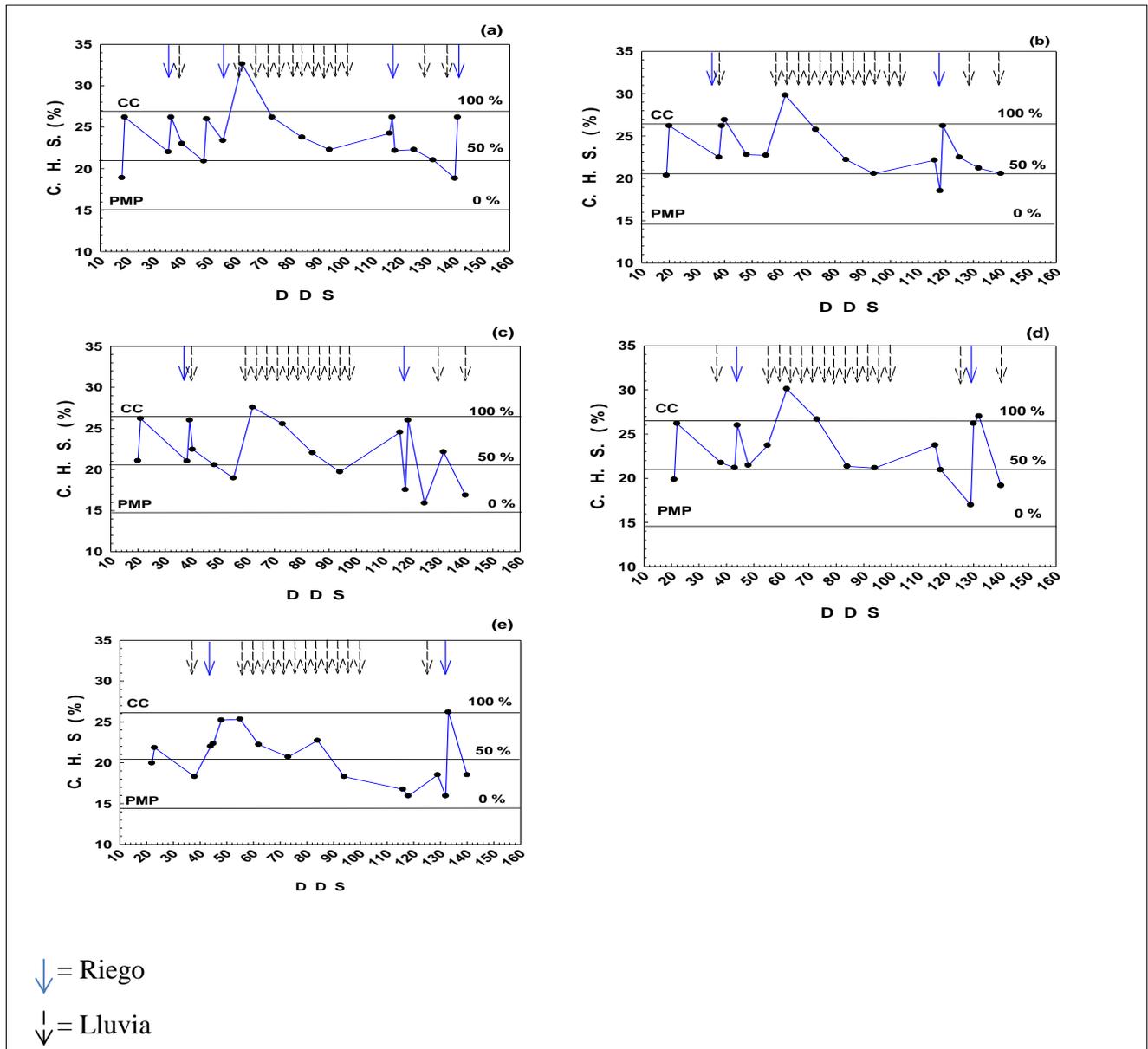


Figura 3. Contenido de humedad en el suelo (CHS) durante del ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).

Relación del CWSI en función del CHS

Los datos utilizados de CHS representa la condición de contenido de agua en el suelo en la zona de raíz (80 cm) en una superficie a campo abierto. Los resultados obtenidos en este estudio muestran una relación negativa entre las variables CWSI y CHS, a medida que el agua en la zona de la raíz del cultivo se fue agotando el CWSI incremento como se muestra en la figura 4. Las condiciones meteorológicas, como también las

características de cultivo juegan un papel muy importante al momento de comparar CWSI vs CHS, Taghvaeian *et al.* (2012) encontraron buena correlación entre estas dos variables, y citan que una buena relación entre estas dos variables puede ser utilizada para determinar la cantidad de agua de riego que necesita ser aplicado a un valor de CWSI.

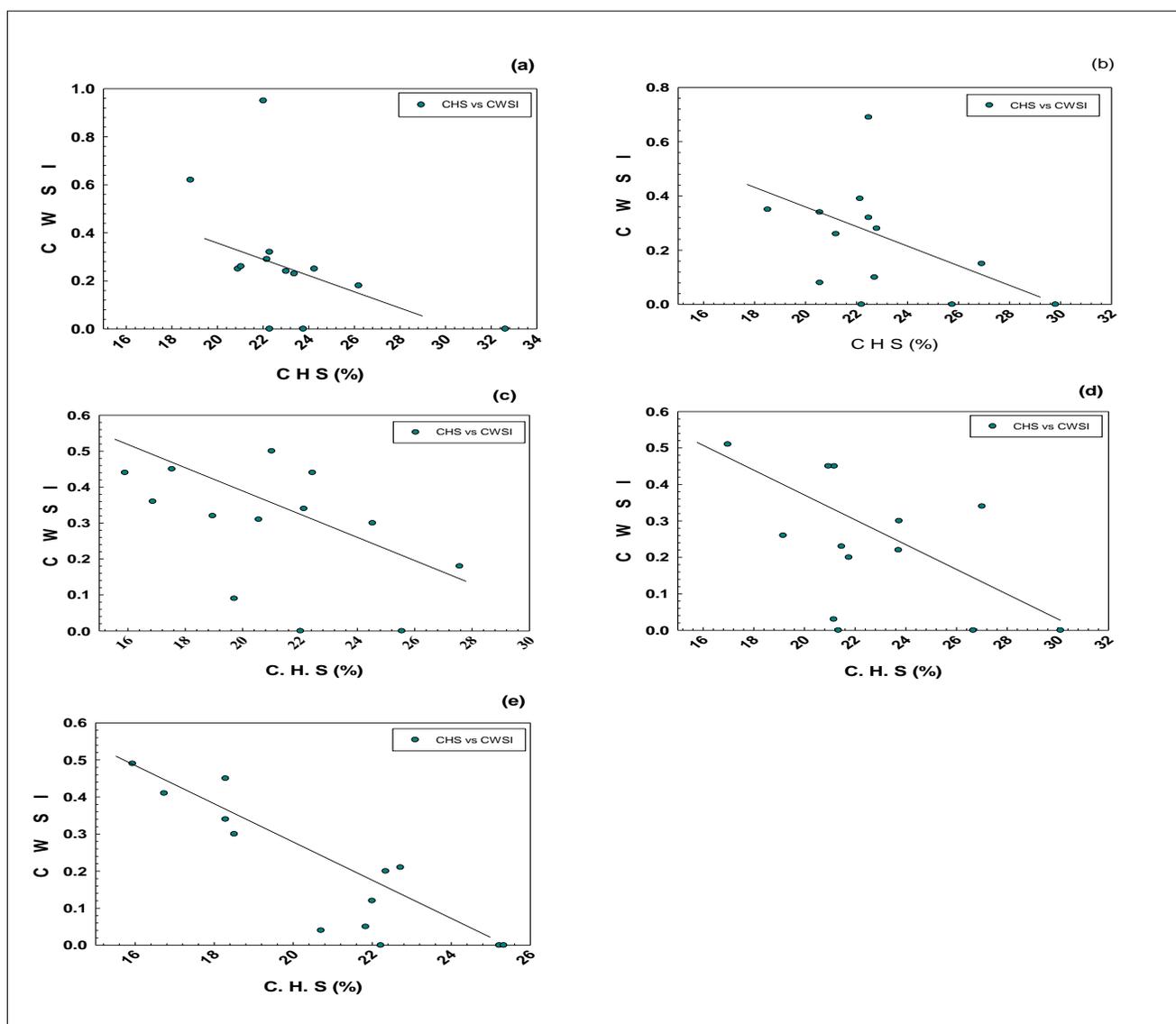


Figura 4. Evolución del CWSI en los diferentes tratamientos en relación con el CHS (% , v/v). T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).

Evolución en el tiempo del Índice de Área Foliar.

En la figura: 4 se muestra el IAF de los tratamientos evaluados, el mayor promedio del IAF se obtuvo en floración: T1= 5.9, T2= 5.3, T3= 5, T4= 4.4 y T5= 4.1, si bien hubo diferencias numéricas estadísticamente los tratamientos fueron iguales y esto puede ser atribuido a que durante la etapa vegetativa las plantas se encontraban en óptimas condiciones de humedad debido a los eventos de precipitación que ocurrieron en esta etapa. El IAF medidos en esta investigación fueron similares a los reportados por Farré *et al.*, (2009) y Bouazzama *et al.*, (2012), quienes reportan a la floración de maíz un valor máximo de IAF de 5.8 y 4.8 respectivamente, para el tratamiento en condición óptima de manejo de agua.

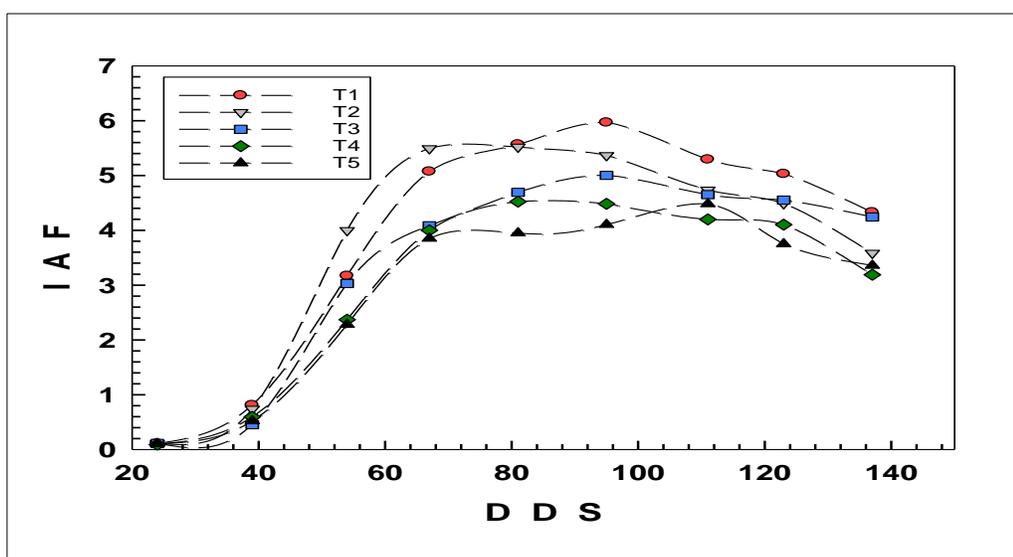


Figura 5. Evolución en el tiempo del Índice de Área Foliar.

Evolución en el tiempo de materia seca total

La producción de MST en los diferentes tratamientos fue de :T1= 26,815 Kg ha⁻¹, T2= 23,548 Kg ha⁻¹, T3= 19635 Kg ha⁻¹, T4= 22048 Kg ha⁻¹, T5= 23236 Kg ha⁻¹. La mayor producción se presentó en el T1 y la menor producción se obtuvo en el T3, como se muestra en la figura 5. En esta investigación no se encontraron diferencias de MST debido a las intensas lluvias presentadas en etapa vegetativa del cultivo. Los valores de MST obtenidos en esta investigación fueron similares a los reportados por otros

investigadores, por ejemplo Gheysari *et al.* (2017) y Farré *et al.* (2009), en condiciones óptimas de manejo obtuvieron 26.8 ton Ha⁻¹ y 23.97 tha⁻¹ respectivamente.

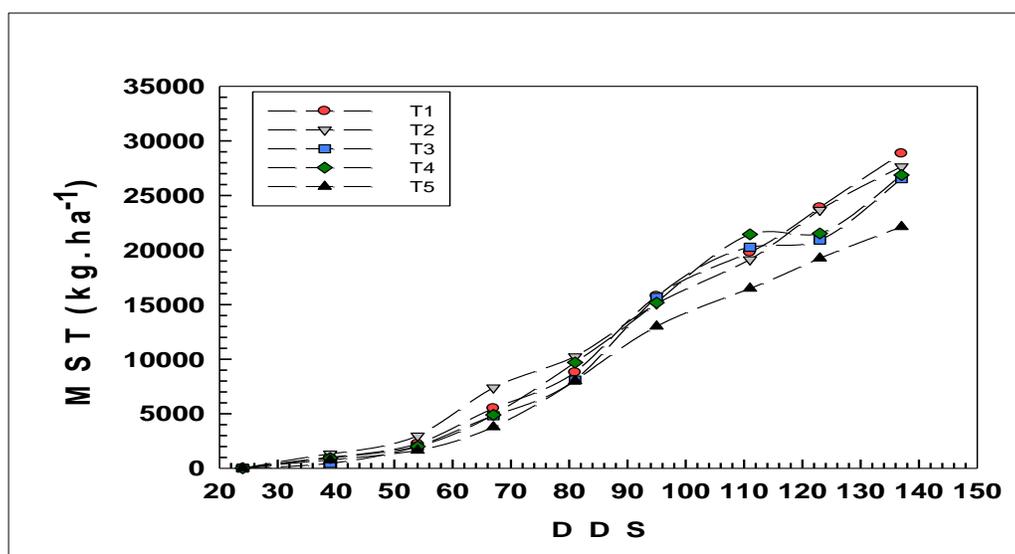


Figura 6. Evolución en el tiempo de la materia seca total.

Peso de 100 granos y rendimiento de grano

Como se citó anteriormente, los tratamientos se diferenciaron durante la etapa reproductiva, de la fase R2 a R5 los tratamientos T1 y T2 que estuvieron en condiciones más óptimas de manejo de agua (CWSI= 0.25 y 0.35 etapa reproductiva), obtuvieron el mayor peso de 100 granos, 37.9 g y 37.6 g respectivamente y el mayor rendimiento, 11,596 kg ha⁻¹ y 11,239 kg ha⁻¹ respectivamente (tabla 3). Los tratamientos T3, T4 y T5 que tuvieron un mayor estrés hídrico en esta etapa (CWSI= 0.5, 0.6 y 0.7 respectivamente), debido a la sensibilidad del maíz al estrés, tuvieron reducción en el peso de 100 granos: T1= 34.3 g; T2= 35.9 g y T3= 34.3 g, que influyó en un menor rendimiento de grano: T1= 9,062 kg ha⁻¹; T2= 9,842 kg ha⁻¹ y T3 = 9,842 kg ha⁻¹ (Cuadro 3). Ayana. (2011) e Igbadun *et al.* (2007) reportaron que el efecto del estrés hídrico en la etapa de floración o reproducción afecta severamente el rendimiento comparado con el estrés en la fase vegetativa de la planta. Irmak *et al.* (2000) en un clima semiárido Mediterráneo, evaluaron el efecto de diferente disponibilidad de agua en el suelo en un cultivo de maíz var. Antbey, encontrando que el valor medio de CWSI de 0.22 antes de los riegos corresponde al mayor rendimiento de grano (6058 kg ha⁻¹) y

al exceder este valor de índice ocasionó reducción en el rendimiento. Por otra parte Kar y Kumar (2010) consideran que para el maíz en un clima subhmedo-subtropical de la India, el CWSI recomendado para un rendimiento óptimo en maíz es de 0.4 en la etapa de floración y 0.6 en las otras etapas.

La relación entre CWSI y el rendimiento de grano fue básicamente lineal como se muestra en la figura 7, Orta *et al.* (2003) e Irmak *et al.* (2000) mencionan que el rendimiento se correlaciona directamente con los valores del CWSI y se puede usar para la predicción de rendimientos.

Cuadro 3. Comparación de medias del peso de 100 granos y rendimiento de grano en los tratamientos.

Trat.	Peso de 100 granos (g)	Rendimiento de grano (kg/ha)
T1	37.96a	11596.3a
T2	37.68a	11239.6a
T3	34.38b	9062.7b
T4	35.94ab	9842.3ab
T5	34.34b	9764.5ab
C.V	3.04	9.12

Valores con la misma letra son iguales entre si (Tukey $P < 0.05$), CV: coeficiente de variación en (%)

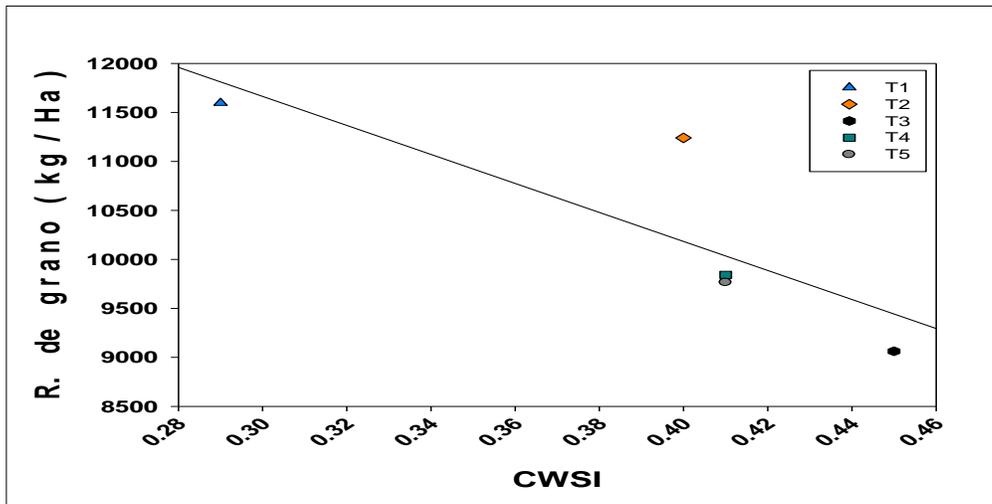


Figura 7. Rendimiento de grano de maíz en función del valor medio de CWSI en la etapa reproductiva.

Conclusiones

Los resultados mostraron que el CWSI es una técnica eficiente para monitorear y cuantificar estrés hídrico en el maíz, respondiendo a la disponibilidad de agua en el suelo, los eventos de riego y condiciones climáticas. Se determinaron relaciones entre CWSI, el contenido de agua en el suelo y rendimiento de grano. Con base en estos resultados, un CWSI de 0.25 en etapa vegetativa y reproductiva antes del riego producirá el máximo crecimiento vegetativo y rendimiento de grano. La termometría infrarroja es un método potencialmente prometedor para detectar estrés hídrico en maíz, que no es destructivo, y puede monitorear el estado hídrico en mayor superficie de un cultivo que los métodos tradicionales.

Referencias

- Agam, N., Cohen, Y., Alchanatis, V., and Ben-Gal, A. (2013) How sensitive is the CWSI to changes in solar radiation?. *International journal of remote sensing*, 34(17): 6109-6120.
- Alderfasi, A. A., Nielsen, D.C. (2001) Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* 47: 69–75.
- Ayana, M. (2011) Deficit irrigation practices as alternative means of improving water use efficiencies in irrigated agriculture: Case study of maize crop at Arba Minch, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 6: 226-235.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., Fereres, E. (2014) Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15: 361-376.
- Bouazzama, B., Xanthoulis, D., Bouaziz, A., Ruelle, P., and Mailhol, J. C. (2012) Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in semi-arid climate of Tadla (Morocco). *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement*, 16: 468.
- Bugarín, M. R., Galvis, S. A., Sánchez, G. P., y García, P. D. (2002). Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra Latinoamericana*, 20(4).
- Çakir, R. (2004) Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89: 1-16.
- Calderón, R., Navas-Cortes, J.A., Lucena, C., Zarco-Tejada, P.J. (2013) High resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*. 139: 231-245.
- Chen, J., Lin, L., Lü, G. (2010) An index of soil drought intensity and degree: an application on corn and a comparison with CWSI. *Agricultural Water Management*. 97: 865–871.
- Cremona, M.V., Stützel, H., Kage, H. (2004) Irrigation Scheduling of Kohlrabi (*Brassicaoleracea* var. *Gongylodes*) Using Crop Water Stress Index. *Hort Science*. 39: 276–279.
- DeJonge, K. C., Taghvaeian, S., Trout, T. J., and Comas, L. H. (2015) Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural water management*, 156: 51-62.

- De Schepper, V., Steppe, K., Van, L. M. C., and Lemeur, R. (2010). Detailed analysis of double girdling effects on stem diameter variations and sap flow in young oak trees. *Environmental and Experimental Botany*, 68(2), 149-156.
- Erdem, Y., Sehirali, S., Erdem, T., Kenar, D. (2006a) Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turk.J. Agric. Forest.* 30: 195–202.
- Erdem, Y., Erdem, T., Orta, A.H., Okursoy, H. (2006b) Canopy–air temperature differential for potato under different irrigation regimes. *Acta Agric. Scand.* 56: 206–216.
- Erdem, Y., Arin, L., Erdem, T., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H., Gültas, H. (2010) Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*). *Agricultural Water Management.* 98: 148–156.
- Farré, I., and Faci, J. M. (2009) Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural water management*, 96: 383-394.
- Fereres, E., and Soriano, M. A. (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58: 147-159.
- Gheysari, M., Sadeghi, S. H., Loescher, H. W., Amiri, S., Zareian, M. J., Majidi, M. M., and Payero, J. O. (2017). Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agricultural Water Management*, 182: 126-138.
- Gálvez, P. R., Callejas, R. R., and Reginato, M.G. (2011). Comparación de la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. *Idesia (Arica)*, 29(2):175-179.
- Geerts, S., and Raes, D. (2009) Deficit irrigation as on farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.
- Gates, D. M. 1964. Leaf temperature and transpiration. *Agron. J.* 56 (3): 273-277.
- Idso, S. B (1982) Now Water Stressed Baselines a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27: 59-70.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., and Hatfield, J. L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.

- Irmak, S., Haman, D. Z. and Bastug, R., 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92: 1221-1227.
- Igbadun, H. E., Tarimo, A. K., Salim, B. A., and Mahoo, H. F., 2007. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. *Agricultural Water Management*, 94: 1-10.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Pinter, P. J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Bulletin*, 17: 1133-1138.
- Kar, G., and Kumar, A., 2010. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. *Irrigation Science*, 28(3): 211-220.
- Khayatnezhad, M., Gholamin, R., Jamaati-Somarin, S. H., and Zabihi-Mahmoodabad, R., 2010. Effects of peg stress on corn cultivars (*Zea mays* L.) at germination stage. *World Appl. Sci. J*, 11(5), 504-506.
- López, L. R., Ramírez A. R., Vásquez P. M., López. C. L., y Sánchez C. L. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México* 35: 97-111.
- Li, L., Nielsen, D.C., Yu, Q., Ma, L., and Ahuja, L.R., 2010. Evaluating the crop water stress index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the north China plain. *Agr. Water Manage.* 97, 1146-1155.
- Maes, W. H., and Steppe, K. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13): 4671-4712.
- Mansouri-Far, C., Sanavy, S. A. M. M., and Saberali, S. F. 2010. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 97(1): 12-22.
- Muktar By., and TT*, Yigezu 2016. Determination of Optimal Irrigation Scheduling for Maize (*Zea Mays*) at Teppi, Southwest of Ethiopia. *Irrigat Drainage Systems Engineering*, 5: 3.
- Nayak, S.S. (2005) Thermal imagery and spectral reflectance based system to monitor crop condition. Mechanical Engineering Department, (Doctoral dissertation). Texas Tech University, Lubbock, TX.
- Ortuño, M. F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D. S., Biel, C., and Casadesus, J. 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97(1), 1-11.

- Orta, A. H., Erdem, Y., and Erdem, T. 2003. Crop water stress index for watermelon. *Scientia Horticulturae* 98: 121-130.
- O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D., Howell, T.A. (2012) Grain sorghum response to irrigation scheduling with the time-temperature threshold method and deficit irrigation levels. *Transaction ASABE* 55: 451-461.
- Payero, J.O., Irmak, S. (2006) Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. *Irrigation Science* 25: 21-32.
- Peters, R.T., Evett, S.R. (2008) Automation of a center pivot using the temperature-time-threshold method of irrigation scheduling. *Journal Irrigation Drainage Engineering* 134: 286-291.
- Piperno, D. R., and Flannery, K. V. 2001. The earliest archaeological maize (*Zea mays* L.) from highland Mexico: new accelerator mass spectrometry dates and their implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(4): 2101-2103.
- Playan, E., Salvador, R., López, C., Lecina, S., Dechmi, F., Zapata, N. (2014) Solid-set sprinkler irrigation controllers driven by simulation models: opportunities and bottle necks. *J. Irrig. Drain. E* 140: 04013001.
- Sezen, S.M., Yazar, A., Yıldız, D., Yucel, S., Akildiz, A., Tekin, S., Akhoundnejad, Y. (2014) Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Agricultural Water Management* 143: 115-131.
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L., and Hansen, N. C. 2012. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing*, 4: 3619-3637.
- Tuzet, A., Perrier, A., and Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*, 26(7):1097-1116.
- Tanaka, A., and Yamaguchi J. 1984. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano de maíz. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. Chapingo México. 120 p.
- Zia, S., Spohrer, K., Wenyong, D., Spreer, W., Romano, G., and Xiongkui, H. 2011. Monitoring physiological responses to water stress in two maize varieties by infrared thermography. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4: 7-15.