

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**  
**ANTONIO NARRO**  
**UNIDAD LAGUNA**  
**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE HÍBRIDOS DE MAÍZ (*Zea mays*  
L.) EN DIFERENTES NIVELES DE SEQUÍA EN RELACIÓN CON  
RASGOS SECUNDARIOS**

**POR:**

**JOSÉ MIGUEL GÓMEZ CERVANTES**

**TÉSIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE HÍBRIDOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN  
DIFERENTES NIVELES DE SEQUÍA EN RELACIÓN CON RASGOS  
SECUNDARIOS

POR  
JOSÉ MIGUEL GÓMEZ CERVANTES

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

APROBADA POR

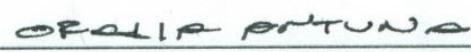
ASESOR PRINCIPAL:

  
DR. ARMANDO ESPINOZA BANDA

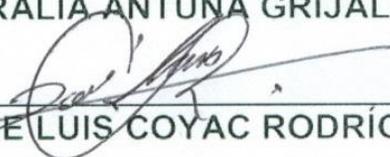
ASESOR:

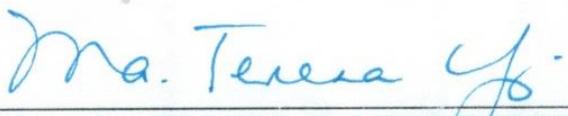
  
DR. SAMUEL TRACHSEL

ASESOR:

  
DRA. ORALIA ANTUNA GRIJALVA

ASESOR:

  
MC. JOSE LUIS COYAC RODRÍGUEZ

  
DRA. MA. TERESA VALDES PEREZGASGA  
COORDINADORA INTERINA DE LA DIVISIÓN DE  
CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA  
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE HÍBRIDOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN  
DIFERENTES NIVELES DE SEQUÍA EN RELACIÓN CON RASGOS  
SECUNDARIOS

POR  
JOSÉ MIGUEL GÓMEZ CERVANTES

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

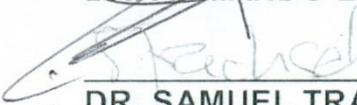
INGENIERO AGRÓNOMO

APROBADA POR

PRESIDENTE:

  
DR. ARMANDO ESPINOZA BANDA

VOCAL:

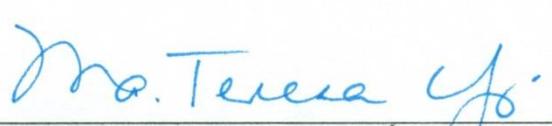
  
DR. SAMUEL TRACHSEL

VOCAL:

  
DRA. ORALIA ANTUNA GRIJALVA

VOCAL SUPLENTE:

  
MC. JOSÉ LUIS COYAC RODRÍGUEZ

  
DRA. MA TERESA VALDÉS PEREZGASGA  
COORDINADORA INTERINA DE LA DIVISIÓN DE  
CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de  
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

ENERO DE 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A dios y a la virgen de Guadalupe;**

Por darme la fuerza y la sabiduría para salir adelante en mis estudios durante toda mi vida y especialmente en mi carrera universitaria, por darme una oportunidad más de vida y permitir que regresara a presentar mi trabajo de tesis y obtener el título de Ingeniero Agrónomo.

### **A mi familia;**

Por brindarme su apoyo incondicional a pesar de las carencias que alguna vez se presentaron y los problemas que ello conlleva nunca dejaron de alientarme y aconsejarme para salir adelante.

### **A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro;**

Con mucho respeto y aprecio por brindarme la oportunidad de salir adelante como persona y formarme como profesionista dentro de sus instalaciones, para finalmente culminar mi gran sueño de ser Ingeniero Agrónomo y darme la oportunidad de hacer algo de utilidad para mi familia y la sociedad.

### **Al Dr. Armando Espinoza Banda;**

Quien a pesar de que no realice mi trabajo de campo bajo su asesoría, acepto colaborar en este proyecto brindándome sus consejos producto de su amplia experiencia, además de ser un gran amigo y profesor que me acompañó durante mi estancia universitaria.

### **Al Dr. Samuel Trachsel;**

Por permitir que realizara este proyecto de tesis con datos obtenidos a partir de híbridos avanzados gracias a sus investigaciones, así mismo por corregirme

y exigirme para dar más y con esto contribuir a la realización de una mejor investigación.

**A la Dra. Oralia Antuna Grijalva y al MC. José Luis Coyac Rodríguez;**

Por ser grandes profesores y amigos, por todos sus consejos, además de guiarme y corregirme para lograr ser un mejor alumno y una mejor persona, también por aceptar formar parte de mi equipo de asesores para culminar con un buen trabajo de tesis.

**Al Ingeniero Edgar Antonio Suarez;**

Por ser un buen amigo y brindarme su confianza para proporcionarme datos de sus ensayos, y porque a pesar de algunas diferencias sé que siempre cuento con su apoyo incondicional.

Al equipo de trabajo del CYMMYT en el programa de fisiología de la estación experimental Tlaltizapán Morelos, porque fueron ellos los que apoyaron todo el tiempo en el trabajo de campo y en la captura de datos para la realización de un buen proyecto de tesis.

## DEDICATORIAS

### **A mis padres;**

**Mi querido padre, JOSÉ MIGUEL GÓMEZ ZAMORA**

**Mi amada madre, MARÍA CERVANTES GARCÍA**

Por haberme regalado la vida, además de que siempre he contado con su apoyo incondicional durante mis estudios y a lo largo de mi vida, por ser el mejor ejemplo y educarme de la manera más correcta posible, por todo eso y mucho más este trabajo es para ustedes queridos padres.

### **A mis hermanos;**

**LUIS GÓMEZ CERVANTES**

**KARLA GÓMEZ CERVANTES**

Por ser mi mayor fuente de inspiración, y estar ahí en todo momento apoyándome y motivándome para la culminación de mis estudios, por todas sus palabras de aliento que tanto me ayudaron cuando más falta me hizo, muchas gracias por eso hermanos son los mejores.

### **A mis amigos;**

**SERGIO ZAPATA ADAME**

**MARIELA OLGUÍN VILLEDA**

**OSCAR DE SANTIAGO ROMERO**

**HERIBERTO ROMERO SILERIO**

Por compartir su amistad durante estos últimos cuatro años de mi vida, a lo largo de nuestra carrera universitaria viví grandes momentos de alegría a junto a ustedes, hoy

solo quedan recuerdos de todo aquello porque por el momento debemos seguir por caminos diferentes en busca de un mejor futuro para nosotros y nuestras familias, y a pesar de que no termine de la mejor manera con todos ellos espero volver a verlos algún día para platicar de nuestros éxitos. Gracias amigos por ser los mejores y hacer de esta carrera algo fácil de transitar, sin ustedes hubiera costado más trabajo. ÉXITO Y SUERTE PARA TODOS.

**Y porque no dedicársela a;**

**JOSÉ MIGUEL GÓMEZ CERVANTES**

Un servidor y la persona más importante en este proyecto, quien con mucha humildad un día decidió ser el mejor estudiante y el mejor profesionista en esta universidad y en diferentes partes, para lograr ello acepto el reto de trabajar en una de las tesis más completa y complicada realizada en esta generación y a pesar de que algunos lo acusarán de soberbio y/o arrogante, hoy con mucho orgullo y humildad puedo decir soy el mejor.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	5
1.2. Hipótesis .....	5
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Generalidades del cultivo .....	6
2.2. Sequía.....	6
2.2.1. Sequía agrícola.....	7
2.2.2. La sequía en floración.....	8
2.2.3. Resistencia y/o tolerancia a sequía .....	10
2.3. El estrés provocado por déficit hídrico .....	12
2.4. Rasgos secundarios.....	15
2.4.1. Estimación de la cobertura vegetal NDVI y rendimiento .....	17
2.4.2. Contenido de clorofila mediante el uso de SPAD y rendimiento .....	22
2.4.3. Efecto del enrollamiento foliar en la planta de maíz.....	25
2.4.4. Senescencia foliar y rendimiento .....	27
2.4.5. La viabilidad de polen y el rendimiento de grano.....	31
2.4.6. Madurez fisiológica como indicador de cosecha.....	33
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>36</b>
3.1. Localización geográfica y características del área de estudio .....	36
3.2. Ubicación del lote experimental .....	36
3.3. Material genético.....	36
3.4. Diseño experimental .....	37

3.5. Descripción de tratamientos.....	37
3.6. Manejo agronómico.....	38
3.6.1. Preparación del terreno .....	38
3.6.2. Siembra .....	39
3.6.3. Instalación del sistema de riego.....	39
3.6.4. Instalación de tubos para tomas de humedad y tomas de humedad .....	40
3.6.5. Aclareo de plantas .....	40
3.6.6. Fertilización.....	40
3.6.7. Riegos.....	41
3.6.8. Control de plagas.....	42
3.6.9. Control de maleza .....	43
3.7. Variables determinadas .....	43
3.7.1. Estimación de la cobertura vegetal (NDVI) .....	44
3.7.2. Contenido de clorofila (SPAD) .....	45
3.7.3. Enrollamiento foliar .....	46
3.7.4. Senescencia foliar.....	46
3.7.5. Determinación del intervalo polen-estigma (ASI).....	47
3.7.6. Viabilidad de polen.....	48
3.7.7. Madurez fisiológica .....	49
3.7.8. Cosecha.....	49
3.7.9. Rendimiento de grano.....	50
3.7.10. Análisis estadístico .....	50
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
4.1. Análisis de varianza .....	51
4.2. Promedios de características secundarias de 16 genotipos de maíz, evaluadas en tres niveles de riego, CIMMYT 2014. ....	54
4.3. Heredabilidad .....	59
4.4. Correlaciones entre variables fisiológicas y rendimiento de grano .....	60
4.4.1. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego normal .....	61
4.4.2. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego intermedio .....	62
4.4.3. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego reducido. .	64

4.4.4. Relación entre el rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego normal.....	65
4.4.5. Relación del rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego intermedio .....	67
4.4.6. Relación del rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego reducido .....	69
4.4.7. Relación entre el rendimiento y el enrollamiento foliar para el tratamiento de riego intermedio .....	71
4.4.8. Relación entre el rendimiento y el enrollamiento foliar para el tratamiento de riego reducido .....	73
4.4.9. Relación entre el rendimiento y la senescencia foliar para el tratamiento de riego intermedio .....	75
4.4.10. Relación entre el rendimiento y la senescencia foliar para el tratamiento de riego reducido .....	76
4.4.11. Relación entre el rendimiento y el intervalo polen-estigma (ASI).....	77
4.4.12. Relación del rendimiento con la viabilidad de polen en maíz.....	80
4.4.13. Relación del rendimiento con la madurez fisiológica en maíz.....	83
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Presentación de los 16 genotipos evaluados en el ensayo, en los tres niveles de sequía: riego normal, riego intermedio, riego restringido, 2014. ....	37
Cuadro 3.2. Momento de aplicación y duración en horas de cada uno de los riegos en los diferentes tratamientos, 2013-14. ....	41
Cuadro 3.3. Escala para medir enrollamiento foliar y característica de identificación en campo .....	46
Cuadro 3.4. Escala de medición de senescencia foliar y porcentaje de área foliar que ha muerto respectivamente.....	47
Cuadro 4.1. Significancia de cuadrados medios de 17 variables registradas en 16 genotipos experimentales evaluados en tres niveles de riego. CIMMYT 2014. ....	54
Cuadro 4.2. Valores medios de 14 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego normal. CIMMYT 2014. ....	56
Cuadro 4.3. Valores medios de 18 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014. ....	57

Cuadro 4.4. Valores medios de 17 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014. ....	58
Cuadro 4.5. Heredabilidad de 18 variables evaluadas en 16 híbridos de maíz establecidos en tres niveles de riego. CIMMYT 2014 .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI para el tratamiento de riego normal en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014. ....	62
Figura 4.2. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI, para el tratamiento de riego intermedio en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014. ....	63
Figura 4.3. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI, para el tratamiento de riego reducido en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014. ....	65
Figura 4.4. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego normal. CIMMYT 2014. ....	66
Figura 4.5. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.....	68
Figura 4.6. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B) y 6(C) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014. ....	70
Figura 4.7. Relación entre el rendimiento de grano y el enrollamiento foliar evaluado a la semana 1(A, B), 2(C, D) y 3(E, F) después de la floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.....	72
Figura 4.8. Relación entre el rendimiento de grano y el enrollamiento foliar evaluado a la semana 1(A, B), 2(C, D) y 3(E, F) después de la floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014. ....	74
Figura 4.9. Relación entre el rendimiento y el AUCSEN evaluada después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014. ....	76
Figura 4.10. Relación entre el rendimiento y el AUCSEN después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014.....	77
Figura 4.11. Relación entre el rendimiento y el intervalo polen-estigma (ASI) evaluada en 16 híbridos de maíz para los tratamientos riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido(C). CIMMYT 2014. ....	79
Figura 4.12. Relación entre el rendimiento y la viabilidad de polen evaluada al segundo día después de floración en dos diferentes horas del día (9:00(1)) y (13:00(2)) en 16 híbridos de maíz para los tratamientos de riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C). CIMMYT 2014. ....	82
Figura 4.13. Relación entre el rendimiento y la madurez fisiológica evaluada en 16 híbridos de maíz para los tratamientos riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C). CIMMYT 2014. ....	85

## RESUMEN

Con el objeto de evaluar la influencia de rasgos secundarios en el rendimiento de maíz en diferentes niveles de sequía, se evaluaron 16 híbridos experimentales de maíz provenientes del centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo (CIMMYT), seleccionados previamente en condiciones de secano.

El experimento se realizó en la estación experimental del CIMMYT en Tlaltizapán, Morelos, durante el ciclo de siembra A2014.

La siembra se realizó el día 19 de noviembre del 2013, se utilizó un diseño de randomización en bloques incompletos; se establecieron tres tratamientos (niveles de humedad) con tres repeticiones por cada uno de ellos, con 16 genotipos por repetición. La parcela experimental consistió en dos surcos de 4.5m de longitud, con una separación de 0.75m y de 0.20m entre plantas.

Se tomaron las variables; índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI), el contenido de clorofila (SPAD), enrollamiento foliar, senescencia foliar, determinación del intervalo polen estigma (ASI), la viabilidad de polen y la madurez fisiológica.

Se realizó análisis de varianza, cuadro de comparación de medias y se calculó la heredabilidad, para conocer el efecto de los diferentes tratamientos, genotipos y la interacción genotipo por tratamiento, detectar los genotipos que se comportan estadísticamente iguales y observar que variables están teniendo mayor influencia en el rendimiento y conocer cuales características pueden seguir siendo evaluadas en futuros ensayos.

También se realizaron correlaciones de cada una de las variables con el rendimiento, utilizando este último como variable dependiente. Para cada caso se elaboró una gráfica de dispersión y la línea de tendencia.

Por los resultados observados se puede establecer que la mayoría de las variables presentan una gran diferencia entre tratamientos y entre genotipos pero que estos presentan una baja correlación con el rendimiento, excepto en el ASI que esta resulta ser alta.

Los híbridos con mayores rendimientos en el tratamiento de riego normal fueron “DTMA155”, “DTMA60”, y “DTMA179”, para el tratamiento de riego intermedio fueron “DTMA85”, “DTMA209”, y “DTMA237”, mientras que para el tratamiento de riego reducido los mejores fueron los híbridos “DTMA287”, “DTMA237”, y “DTMA209”.

**Palabras clave:** Maíz, rendimiento, mejoramiento, sequía, rasgos secundarios.

## I. INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica, especialmente en México y Mesoamérica, el maíz (*Z. mays* L.) es la principal fuente de carbohidratos para el consumo humano. Además de formar parte fundamental de la dieta en muchas partes de la región, es un cereal de primera importancia en la alimentación animal y tiene por lo tanto gran importancia socioeconómica y cultural (Pelacho, 2008).

En el 2013, la producción mundial fue de 984.37 millones de toneladas. México ocupó el séptimo lugar en la producción con 22, 500, 000 toneladas (FAO, 2014). Sin embargo, el incremento por efecto del cambio climático global tendrá en la mayoría de las regiones del planeta, incluyendo las regiones agrícolas Latinoamericanas, un impacto negativo en los cultivos.

Lobell *et al.* (2008) muestran como el incremento de las temperaturas asociados al cambio climático afectaran negativamente los rendimientos del maíz, trigo, arroz y otros cultivos extensivos en los que la alimentación de la humanidad descansa; por lo que estos efectos tendrán un impacto importante sobre la seguridad alimentaria.

En el caso del maíz, la sensibilidad del rendimiento a un estrés abiótico es generado mucho mayor si este ocurre durante el periodo de pocas semanas alrededor de la floración que es cuando se determina fuertemente el número de granos por unidad de área, (Westgate *et al.*, 2004); o durante el llenado de granos, cuando el peso final de los granaos se está determinado (Borras *et al.*, 2004; Gambín *et al.*, 2006).

En México el principal factor que limita la productividad de los cultivos anuales en condiciones de temporal es la sequía; la magnitud del daño que esta puede ocasionar, en particular al maíz, depende de las etapas de desarrollo de la planta en que esta ocurra; las etapas más críticas son las cercanas a la floración (Edmeades *et al.*, citados por Guzmán, 2013)

El estrés hídrico tiene efectos negativos sobre la síntesis de proteínas en las plantas, por lo que es posible que la capacidad de resistencia de un genotipo a estrés hídrico, pudiera estar relacionada de alguna manera con la capacidad de síntesis de cierto tipo de proteínas (Espinosa *et al.*, citados por Guzmán, 2013).

Los fisiólogos de CIMMYT han evaluado muchas características secundarias con el fin de establecer cuan útiles son en un programa de mejoramiento de tolerancia a sequía, pero pocas características han sido utilizadas en los programas fitogenéticos y un número aún menor ha contribuido en realidad a mejorar la tolerancia a sequía. (Banziger *et al.*, 2012).

Existen un conjunto de parámetros numéricos que permiten estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación con base en la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. Estos parámetros permiten la construcción de índices, dentro de los cuales el más conocido y usado es el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI- Normalized Difference Vegetation Index).

Chang *et al.*, (2003), establecieron que los modelos de pronóstico de rendimiento del maíz desarrollados a partir de información radiométrica explican una mayor proporción de la variabilidad del rendimiento, por lo general, cuando consideran varias fechas de muestreo durante el ciclo.

Esta información es relevante porque las etapas de desarrollo de los cultivos presentan condiciones de sensibilidad particular frente al estrés hídrico. En el caso del maíz, la floración es una fase decisiva en la determinación del rendimiento final, razón por la cual las condiciones climáticas que acompañan su ocurrencia son utilizadas de manera particular con fines de pronóstico (Dale y Daniels, 1995) o para evaluar el impacto de la sequía (Meyer *et al.*, 1993).

Por otro lado, el alto contenido y la estabilidad de la clorofila en la hoja de varios cultivos son características que han mostrado una amplia relación con una alta capacidad fotosintética. La medición del contenido relativo de la clorofila con el SPAD, se ha propuesto en estudios de sequía como criterio para la selección de genotipos (Fotovat *et al.*, 2007). Además, el contenido total de clorofila puede ser rápidamente determinado con el SPAD® (Arunyanark *et al.*, 2008), y sus valores presentan una correlación alta con los valores determinados mediante el método de extracción de clorofila, así como con la eficiencia transpiratoria (Arunyanark *et al.*, 2008; Fotovat *et al.*, 2007) y con el área foliar específica (Fotovat *et al.*, 2007), en diferentes condiciones de humedad.

Otra característica secundaria importante es la senescencia foliar, el principal propósito de esta en las plantas es la movilización y reciclaje de nutrientes que las hojas ya no necesitan y que el fruto o semilla requieren para su desarrollo (Thomas y Donnison, citados por guzmán, 2013).

Algunas plantas cultivadas muestran cierta capacidad de adaptación a la sequía, por ejemplo, orientando las hojas para que no presenten la cara al sol (frijol) o enrollándolas como el maíz, (Avendaño *et al.*, 2008).

El enrollamiento foliar es uno de los mecanismos de reducción de la radiación interceptada como respuesta al estrés hídrico. Además de reducir la radiación interceptada por el cultivo, el enrollamiento foliar se menciona como un mecanismo de la reducción de la transpiración y por tanto de ahorro de agua en momentos de déficit hídrico (Avendaño *et al.*, 2008).

De acuerdo con lo anterior el presente trabajo consistirá en evaluar la influencia de rasgos secundarios en el rendimiento de 16 genotipos de maíz en diferentes niveles de sequía como lo es el riego normal, riego intermedio y riego reducido.

## 1.1. Objetivos

Determinar cuáles son los mejores híbridos de acuerdo a su tolerancia a sequía expresada a través de los rasgos secundarios durante su desarrollo.

Evaluar la relación que existe entre los rasgos secundarios y el rendimiento de grano de maíz en diferentes etapas del ciclo del cultivo en 3 diferentes condiciones de sequía: riego normal, riego intermedio y riego reducido.

## 1.2. Hipótesis

**H<sub>0</sub>:** Es posible estimar la tolerancia a sequía en maíz de acuerdo con los rasgos secundarios que esté presente.

**H<sub>A</sub>:** No es posible estimar la tolerancia a sequía en maíz de acuerdo con los rasgos secundarios que esté presente.

**H<sub>0</sub>:** Existe una relación entre los rasgos secundarios presentes en diferentes etapas del ciclo del cultivo y el rendimiento de grano en maíz.

**H<sub>A</sub>:** No existe una relación entre los rasgos secundarios presentes en diferentes etapas del ciclo del cultivo y el rendimiento de grano en maíz.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades del cultivo

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Pertenece a la familia de las Poaceas (Gramíneas), tribu Mydeas, y es la única especie cultivada de este género. En México tiene una gran importancia de tipo ancestral y social ya que es un cultivo de origen mexicano, y por eso el 80% de sus pobladores basan su dieta alimenticia en este cereal (FAO, 1993).

Es una gramínea de tipo fotosintético C4 con elevados potenciales de producción de biomasa y rendimiento. A su vez posee altas exigencias en el ambiente de producción y en la tecnología aplicada (Andrade *et al.*, 1996). El rendimiento promedio obtenido de maíz en condiciones de secano presenta una brecha muy amplia en relación al logrado con riego suplementario (Sawchik y Formoso, 2000; Cardellino y Baetghen, 2000).

### 2.2. Sequía

Una de las catástrofes capaz de modificar en gran escala el ambiente de una región es la falta de agua, y sus efectos más espectaculares y dramáticos se manifiestan en la alteración de las actividades económicas habituales, en el deterioro de la calidad y condiciones de vida de los habitantes y en el daño a las condiciones ambientales (flora, fauna y paisaje). Sin embargo, la complejidad del fenómeno propicia la creencia errónea de que después de una sequía severa, no ocurrirá otra igual o de proporciones mayores. Por ende, con demasiada frecuencia, sobre todo

en los países menos desarrollados, no es usual prepararse para su ocurrencia futura, que será una certeza. Esta es la paradoja que hace cada vez más vulnerable a una sociedad que no genera medidas de prevención, porque no espera que suceda lo mismo o algo peor (Velasco *et al.*, 2005).

Las causas de la sequía no se conocen con precisión, pero se admite que en general se debe a alteraciones de los patrones de circulación atmosférica, que a su vez los ocasiona el calentamiento desigual de la corteza terrestre y de las masas de agua, manifestado en fenómenos como “El Niño”, también la quema de combustibles fósiles, la deforestación, el cambio de uso de suelo y la actividad antropogénica en general contribuyen a la modificación de la atmosfera, y con ello de los patrones de precipitación (Velasco *et al.*, 2005).

### **2.2.1. Sequía agrícola**

La sequía agrícola es ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce la producción agrícola con relación a la considerada como normal a los valores esperados para una región dada (Bootsma *et al.*, 1996).

De carácter estacional, relativo a la duración del desarrollo fenológico de los cultivos. Se caracteriza por humedad insuficiente en forma natural en el suelo, que se manifiesta por desarrollo vegetativo menor o nulo, y por ende, en bajas en los rendimientos. El carácter estacional no es que dure una estación determinada, sino que se presente en un periodo que se esperaría fuera lluvioso. Las áreas de temporal o secano, que dependen de la lluvia, son las que resisten más esta faceta de la sequía, la que aun moderada puede tener efectos severos en las actividades agrícolas, ya que si ocurre en periodos tempranos, afecta la fase de siembra, y en

etapas avanzadas puede disminuir drásticamente la densidad de los cultivos y su rendimiento. Este tipo de sequía es uno de los más sensibles, y afecta a los sectores vulnerables, pues la inoportunidad de la lluvia puede significar un año completo sin producción agrícola, tanto comercial como de autoconsumo, lo que se traduce en los consecuentes problemas sociales y económicos de la población dependiente de este sector. Esta sequía puede catalogarse como de duración media o de mediano plazo (Velasco *et al.*, 1995).

En maíz, la sequía reduce el rendimiento de grano como consecuencia del menor número de granos por mazorca y peso del mismo (Stone *et al.*, 2001).

### **2.2.2. La sequía en floración**

El estrés de la floración ocurre cuando hay un periodo seco entre el inicio de la antesis y la aparición de los estambres, lo cual puede llevar a la esterilidad o a una severa reducción en el número de granos por mazorca (Fisher *et al.*, 1989).

Para lograr un estrés de este tipo el riego se programa de manera tal que la sequía durante la floración sea lo suficientemente severo como para retrasar la emisión de estigmas y provocar el aborto de las mazorcas. Los componentes que determinan el rendimiento son el número de granos y de mazorcas por planta (Bolaños y Edmeades, 1996).

El maíz es particularmente sensible al estrés en el momento de la floración: un nivel de estrés que tendría poco efecto sobre el rendimiento si ocurriera en una etapa vegetativa o durante el llenado de grano, puede ser catastrófico durante esta

etapa de crecimiento. Lamentablemente, en muchas regiones maiceras ocurre un corto periodo seco alrededor de dos meses después del inicio de las lluvias, coincidiendo con esta delicada etapa del cultivo. La elongación de los estambres es muy sensible al contenido de agua de la planta y al abastecimiento de materia asimilada y el estrés antes de la floración puede aumentar el intervalo entre la antesis y la aparición de los estambres (ASI) (Fisher *et al.*, 1989).

Si el ASI (anthesis-silking interval) se incrementa, los estigmas emergen muy tarde para capturar el polen liberado, y los rendimientos caen dramáticamente. Ya que estos estigmas largos, húmedos y pegajosos, dependen de un suministro suficiente de agua para brotar en el momento correcto, la limitación de agua es una causa de valores más altos de ASI (Westgate *et al.*, 2004).

Lo ideal es que el ASI dure, en promedio, de 4 a 8 días, que el número de mazorcas por planta sea, en promedio, de 0.3 a 0.7, y que los rendimientos sean, en promedio, de 1 a 2 t ha<sup>-1</sup> (o sea, de 15 a 20% de los rendimientos en condiciones de agua abundante). Si el estrés por sequía durante la floración no es suficientemente grave, la precisión (heredabilidad y varianza genética) con la que el ASI y el número de mazorcas por planta pueden ser medidos disminuye (Bolaños y Edmeades, 1996).

Esta respuesta está mediada por la hormona ácido abscisico (ABA) (Leung y Giraudat, 1998; Zhang y Outlaw, 2001).

El ABA está involucrado en el proceso de adaptación de la planta a diferentes tipos de estrés ambiental, y se ha comprobado que durante estos estreses los niveles de ABA se incrementan en los tejidos vegetativos (Zeevaart y Creelmen,

1988). Esta relación llevo a proponer que el ABA es uno de los mediadores de dichas respuestas y que sus niveles en una planta pueden ser determinantes de su comportamiento frente a una condición de estrés (Galau *et al.*, 1986; Zeevaart y Creelmen, 1988; Bray, 1991).

Estos niveles son modulados por un balance preciso entre la biosíntesis y el catabolismo de esta hormona. Aunque muchos genes que se expresan durante el estrés hídrico están regulados por el ABA, se ha encontrado que la expresión de algunos es total o parcialmente independiente de ABA (Chandler y Robertson, 1994).

En maíz la acumulación de ácido abscisico se genera principalmente en las raíces y estimula su crecimiento. De ahí, pasa a las hojas (y, en mucho menor grado, a los granos), donde provoca enrollamiento, cierra los estomas y acelera la senescencia foliar. Esto sucede aun antes de que los mecanismos hidráulicos reduzcan la turgencia foliar (Banziger *et al.*, 2012).

Es probable que esta señal, enviada por las raíces, sea la que hace que la planta reduzca las pérdidas de agua. Por tanto, el ABA es un regulador del crecimiento vegetal que ayuda a la planta a sobrevivir al estrés por sequía, pero que no parece contribuir a la producción en condiciones de sequía. Este ácido también pasa al grano, donde contribuye al aborto de los granos de la punta durante el llenado de grano (Banziger *et al.*, 2012).

### **2.2.3. Resistencia y/o tolerancia a sequía**

Se refiere a la posesión de características morfológicas y/o fisiológicas permitiendo a la planta aguantar la sequía y a veces el calor intenso y la radiación así

como los vientos violentos, los daños por tormentas de arena. Dentro de las características Xerofíticas morfológicas y fisiológicas hay que incluir:

- a) Achicamiento de las células (incluso de los estomas).
- b) Aumento de espesor de las paredes celulares.
- c) Desarrollo acentuado del mesofilo empalizada.

Aumento del uso de los estomas y de los haces vasculares (Oppenheimer, 1961).

A lo largo de la evolución, las plantas han desarrollado diferentes respuestas y adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones de constante déficit hídrico (Nilsen y Orcutt, 1996).

Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, las plantas pueden presentar respuestas de aclimatación que tienen efectos sobre el crecimiento, como la disminución de la expansión foliar y el aumento del crecimiento radicular (Potters *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2008).

Las restricciones causadas por la baja disponibilidad de agua del suelo o por la alta demanda evaporativa accionan ciertos mecanismos fisiológicos que permiten a los vegetales escapar o tolerar esas limitaciones climáticas, modificando su crecimiento y desarrollo (Pimentel *et al.*, citados por Guzmán, 2013).

Un mecanismo de resistencia a nivel fisiológico es el cierre de estomas, estructuras responsables de la mayor proporción de pérdida de agua en las plantas (Taiz y Zeiger, 2006).

El cierre de estomas evita la pérdida excesiva de agua pero reduce la fotosíntesis de la hoja, lo que a su vez limita la producción de los fotoasimilados necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta, en consecuencia, la tasa de acumulación de materia seca en las diferentes estructuras se reduce (Bolaños y Edmeades, 1993).

### **2.3. El estrés provocado por déficit hídrico**

El agua es importante para la planta por que funciona como solvente, como agente enfriador y como reactivo; además, conserva la estructura de la planta al mantener la presión intercelular al nivel requerido para que las células se puedan expandir al máximo (es decir, que estén turgentes). Cuando la planta se marchita su turgencia se acerca a cero, las células comienzan a colapsarse, las membranas se dañan y las proteínas (por ejemplo, algunas enzimas clave) se desnaturalizan porque su estructura se altera. Las células pueden recuperarse después de haber padecido estrés por sequía, pero tienen que reparar el daño, lo cual toma tiempo (de 0.5 a 7 días). Si el daño es severo las células mueren (Banziger *et al.*, 2012).

Cuando hay estrés de leve a moderado, la expansión celular se inhibe. A medida que el estrés se intensifica, esto se manifiesta en una menor expansión del área foliar, seguida por un menor crecimiento de los estigmas, un menor alargamiento del tallo y, finalmente, menos crecimiento radicular (Banziger *et al.*, 2012).

Cuando hay estrés severo por sequía, la división celular se inhibe de forma tal, que aunque el estrés desaparezca, los órganos afectados no tienen células suficientes para expandirse plenamente (Banziger *et al.*, 2012).

El estrés hídrico durante etapas vegetativas y la floración, reducen el número de granos e incrementan la cantidad de plantas sin mazorcas. Durante el llenado del grano en la mazorca, esta condición genera granos chicos (Campos *et al.*, 2006).

El Fitomejoramiento para aumentar el rendimiento de grano en condiciones de estrés es muy complicado, debido a la baja heredabilidad de este carácter cuantitativo y principalmente a la variación en la intensidad del estrés en condiciones de campo (Ludlow y Muchow, 1990), por lo que es necesario que existan criterios de selección adicionales al de rendimiento de grano. Como tradicionalmente se ha hecho.

La clave para mejorar la tolerancia a sequía es manejar bien el estrés. Esto se logra realizando los ensayos en parte, o por completo, durante la temporada seca y manejando el estrés por medio del riego. El objeto de dichos experimento no es simular el campo de un agricultor, sino simular un estrés claramente definido, tal y como ocurre en los campos de los agricultores (Banziger *et al.*, 2012).

El momento, la intensidad y la uniformidad con que se aplica el estrés son factores que se deben considerar al manejar el estrés. El momento en que se aplica el estrés, las etapas de crecimiento objetivo deben ser susceptibles a él, deben tener una gran probabilidad de ser afectadas por ese estrés en el ambiente objetivo y estar determinadas por características que puedan ser modificadas mediante el mejoramiento (Banziger *et al.*, 2012).

La intensidad del estrés debe ser lo suficientemente severo como para que las características que son importantes para el rendimiento en esas condiciones sean

distintas de las que afectan el rendimiento en condiciones donde no hay estrés (Banziger *et al.*, 2012).

La uniformidad, si el estrés es uniforme en el espacio y en el tiempo, las diferencias genéticas serán más fáciles de observar y el avance será mayor (Banziger *et al.*, 2012).

Es posible resolver el problema de cómo determinar el momento en que hay que suspender el riego, mediante el manejo de dos niveles de estrés en dos campos diferentes, pero sembrados con los mismos ensayos. Estos dos niveles de estrés crean ambientes de selección que son representativos de dos tipos de estreses por sequía diferentes e importantes: estrés a la floración y estrés al llenado de grano (Banziger *et al.*, 2012).

El comportamiento, crecimiento y desarrollo de un cultivo constituyen indicadores integrales, que revelan la eficiencia de un determinado sistema agronómico dentro de los límites de un medio ambiente agroecológico. Cualquier variedad que haya sido seleccionada para una zona agroecológica dada, actuará como un indicador integral de todos los factores medioambientales y revelará cómo el manejo agronómico influye y determina el uso eficiente de los recursos (Verhulst *et al.*, 2011).

Al final del ciclo, el rendimiento es el resultado estático y final del comportamiento de un cultivo; sin embargo, tal resultado no refleja las fluctuaciones que ese comportamiento presentó durante el ciclo. Los rendimientos no permiten evaluar las interacciones que hubo, durante el ciclo entre el manejo agronómico y el

ambiente de producción, ni tampoco entender totalmente la influencia del manejo agronómico (Verhulst *et al.*, 2011).

#### **2.4. Rasgos secundarios**

Mejorar para déficit hídrico no es una tarea fácil, ya que éste se considera como un carácter de herencia cuantitativa. Por lo que para tener mayor avance en el mejoramiento por resistencia a sequía, se han aplicado diferentes índices de selección (Castañón *et al.*, 2000)

Diferentes propuestas se han vertido para tener avances más rápidos en mejoramiento por deficiencia de humedad. Ludlow y Muchow (1990), Bolaños y Edmeades (1996) sugirieron usar caracteres secundarios como criterio de selección, de esta forma se contribuye en el mejoramiento de la respuesta de las plantas al déficit hídrico. Respecto al uso de caracteres secundarios para mejorar para sequía, Peña y Martín del Campo (1993) encontraron al índice de cosecha y mazorcas por planta, como las características más asociadas con el rendimiento de grano en condición de temporal y sequía, por lo que los autores consideran esos caracteres como variables útiles de selección. Así mismo reportaron más caracteres asociados a la floración masculina, intervalo entre floración masculina y femenina, y número de mazorcas por planta con el rendimiento de grano en sequía que en riego.

Kitbamroong y Chantachume (1992), usaron el índice de sequía (ID) propuesto por Fischer, Johnson y Edmeades (1984) para seleccionar líneas S1 de maíz evaluadas éstas en riego y sequía. Los autores señalan, que el ID parece ser un criterio útil para mejorar para sequía y/o buena adaptabilidad a la población de donde se derivaron las líneas. En la evaluación compuestos de maíz en tres niveles

de humedad. Se encontraron mayor avance genético para rendimiento de grano en condiciones intermedias y drásticas de sequía que en riego (Gutiérrez y Luna, 1989).

El uso de caracteres o rasgos secundarios puede mejorar la precisión con que se identifican los genotipos que toleran la sequía en comparación con la precisión que se logra midiendo solo el rendimiento de grano en condiciones de sequía. Esto se debe a que, cuando hay estrés la heredabilidad del rendimiento de grano suele disminuir, en tanto que la heredabilidad de algunas características secundarias se mantienen alta y, al mismo tiempo, la correlación genética entre el rendimiento de grano y dichas características aumenta de forma marcada (Banziger y Lafitte, 1997; Bolaños y Edmeades, 1996).

Pueden revelar el grado al cual un cultivo ha sido afectado por el estrés por sequía (Banziger *et al.*, 2012).

Si se les observa antes o durante la floración, estas características pueden ser de utilidad al seleccionar progenitores apropiados para el cruzamiento. Si se les observa antes de la madurez, se pueden utilizar para hacer la selección preliminar, cuando el intervalo entre ciclos consecutivos es corto (Banziger *et al.*, 2012).

Se han escrito muchas revisiones bibliográficas sobre las características secundarias asociadas a la tolerancia a sequía, pero pocas características han sido utilizadas en los programas filogenéticos y un número aún menor ha contribuido en realidad a mejorar la tolerancia a sequía en el maíz (Banziger *et al.*, 2012).

Por esta razón, Edmeades *et al.*, en 1998 establecieron que la característica secundaria ideal debe:

- a) Estar genéticamente asociada al rendimiento de grano bajo estrés.
- b) Ser altamente heredable.
- c) Ser genéticamente variable.
- d) Su medición debe ser rápida y poco costosa.
- e) Ser estable durante el periodo de medición.
- f) No estar asociada a un castigo del rendimiento en condiciones sin estrés.
- g) Observarse durante o antes de la floración, a fin de no cruzar progenitores inapropiados.
- h) Ser un estimador confiable del potencial de rendimiento antes de la cosecha.

#### **2.4.1. Estimación de la cobertura vegetal NDVI y rendimiento**

La predicción del rendimiento de los cultivos anticipada a la cosecha ha sido un objetivo prioritario de la agrometeorología, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima/cultivo como para generar información que se pueda aprovechar oportunamente en la planificación y manejo de la producción agropecuaria. Las técnicas de estimación del rendimiento se incrementaron con el desarrollo de la tecnología satelital, dando lugar a una gama de posibilidades que comprenden, además de los procedimientos originales en base a modelos matemáticos de simulación de cultivos, a los que emplean información exclusivamente satelital, como así también los que integran ambas fuentes de datos (Weiss *et al.*, 2001; Doraiswamy *et al.*, 2003).

Existen un conjunto de parámetros numéricos que permiten estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. Estos parámetros permiten la construcción de índices,

dentro de los cuales el más conocido y usado es el índice diferencial de vegetación normalizado (Kumar y Silva, 1973).

El NDVI está basado en las propiedades de los tejidos vegetales verdes de reflejar la radiación solar incidente de manera diferencial en la banda espectral correspondiente al rojo del espectro visible "VIS" (0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$ ) y la correspondiente al infrarrojo cercano "NIR" (0.7 – 1,1  $\mu\text{m}$ ). La presencia de clorofila en el tejido vegetal provoca una alta reflexión en el infrarrojo cercano y una baja reflexión en el rojo. Así es de esperar que el NDVI alcance valores mínimos en suelo desnudo y máximos cuando el dosel se acerque a cobertura total (Teal, *et al.*, 2004).

Las mediciones satelitales del NDVI se ven influenciadas por varios factores que no tienen relación con la vegetación, como las condiciones atmosféricas (por ejemplo, nubes, aerosoles y vapor de agua), la geometría y calibración satelitales (ángulos de visión y solares), así como por el tipo de suelo y la cobertura de los cultivos (Holben 1986).

El NDVI ha sido correlacionado con numerosas variables como: la deficiencia de nutrientes en los cultivos, el rendimiento de cereales de grano pequeño y el estrés hídrico prolongado de las plantas. Sin embargo, más que reflejar el efecto de un solo parámetro, el NDVI tiene que ser considerado como una medida del crecimiento integral de la planta, incluyendo factores que intervienen en dicho crecimiento. Es probable que las características físicas detectadas por medio del índice estén relacionadas con propiedades que determinan la densidad del follaje (por ejemplo, la superficie foliar o el porcentaje de cobertura) o con la biomasa total. La variabilidad de un índice no está relacionada con una sola característica de la planta o del suelo, por lo cual es necesario tener una idea del factor limitante de crecimiento del cultivo. Por ejemplo, si en un campo donde el factor limitante es el N, seguramente el NDVI

tendrá una fuerte correlación con la cantidad de N disponible en el suelo; sin embargo, en una parcela donde el factor limitante es el agua, el NDVI estará correlacionado en igual medida con la humedad del suelo disponible para las plantas (Verhulst, *et al.*, 2010).

Durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, el índice NDVI puede evaluar la absorción de radiación, uno de los parámetros que determina biomasa y rendimiento final (Gamon *et al.*, 1997). Carlson y Ripley (1997) encontraron, en trigo, que la radiación interceptada y el IAF mostraron una correlación alta con el NDVI.

El rendimiento de grano también puede predecirse con medidas sucesivas de NDVI durante la estación de crecimiento (Wiegand *et al.*, 1991). En trigo, NDVI se asocia con el rendimiento de grano ( $r^2 = 0.55$  a  $0.66$ ), desde la etapa de espigamiento, hasta la senescencia (Rudorff y Batista, 1990; Wiegand y Richardson, 1990).

Calera *et al.*, (2003) utilizaron lecturas de NDVI obtenidas con imágenes satelitales y hallaron muy buenas correlaciones entre éste y el coeficiente de extinción de la radiación en el cultivo ( $k_c$ ), estableciendo con ello necesidades de riego.

Raun *et al.*, (2001) identificaron etapas críticas del crecimiento en los cuales el potencial de la producción se podría predecir como resultado de la fuerte relación entre NDVI y la producción de grano.

Martin *et al.*, (2007) determinaron que en las etapas tempranas del crecimiento ( $V_3$  a  $V_5$ ), el rendimiento en grano y la biomasa no se correlacionaron con el NDVI ( $R_2$  26%), en los estadios  $V_6$  y  $V_7$  el ajuste fue de un 29% y en las etapas comprendidas entre  $V_8$  y  $V_{12}$  el mismo subió hasta el 66%. Recientemente encontraron un ajuste del 77% entre el NDVI (lectura realizada en  $V_8$ ) y el rendimiento del maíz.

#### 2.4.1.1. Sensor portátil Green Seeker para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

El Green Seeker (green = verde y seek = buscar) es un instrumento que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos (Gutiérrez *et al.*, 2011).

Este índice es adjetivado como “normalizado” porque produce valores en el rango del 1 y el -1.

A diferencia de las imágenes aéreas y satelitales, este sistema provee información obtenida localmente y de forma rápida mediante determinaciones terrestres. Además, puede contribuir a disminuir los costos de producción, porque permitirá aplicar la cantidad exacta de fertilizantes y de agua, y la mitigación del estrés en el momento apropiado y en el lugar correcto (Verhulst *et al.*, 2011).

Comparando plantas en óptimas condiciones nutricionales y sanitarias, con estresadas, el Green Seeker permite establecer diferencias en un simple índice

numérico (NDVI) que puede reflejar el estado fisiológico de los cultivos en el campo. Las plantas sanas y vigorosas absorben más luz roja y reflejan más luz infrarroja (IRC) que aquellas con problemas fisiológicos (Gutiérrez *et al.*, 2011).

El Green Seeker comercialmente disponible para aplicaciones agrícolas utiliza la segunda generación de la tecnología de sensores ópticos. Este utiliza diodos emisores de luz (luz LED) para emitir su propia luz roja e infrarroja. La luz roja (570 a 680 nm) emitida por el instrumento que es dirigida hacia las superficies cultivadas, y simultáneamente, mide la luz que reflejan las hojas (infrarroja cercana, 725-1020 nm), calculando valores numéricos que están relacionados con la salud y el vigor de las plantas “en tiempo real” (Gutiérrez *et al.*, 2011).

El Green Seeker (modelo RT100, NTech, California, EEUU) está constituido por el sensor, ajustable en incrementos de 15°, montado sobre un brazo de longitud también ajustable, que permite mantenerlo paralelo a la superficie de la vegetación. Un centro de control provee energía a los sensores ópticos y externos. Está equipado además con una computadora portátil de bolsillo (PDA) y programas para la recolección y procesamiento inicial de los datos (Gutiérrez *et al.*, 2011).

Conforme el sensor pasa sobre la superficie del cultivo, mide tanto la radiación incidente como la reflejada por el dosel, y calcula el NDVI como un cociente de luz roja: luz infrarroja. La luz emitida por fuentes naturales es separada de la emitida por el instrumento electrónicamente. La distancia entre el sensor y la superficie del cultivo debe ser de 80-120 cm. Se realizan aproximadamente diez lecturas por segundo (Gutiérrez *et al.*, 2011).

#### 2.4.1.2. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) se define como el cociente entre el total del área de las hojas verdes (considerando la cara superior solamente) y el área del suelo donde estas plantas crecen. Las unidades en que se expresan son m<sup>2</sup> de área de hojas por m<sup>2</sup> de suelo. Los valores de IAF difieren de un cultivo a otro, pero valores de 3 a 5 son comunes en cultivos que cubren el suelo en su fase de máximo desarrollo. Para un cultivo dado IAF cambia a lo largo de su desarrollo, y normalmente alcanza un máximo en la fase de floración. Como la radiación solar incide en un mismo instante y por unidad de área es la misma de un punto a otro en el tamaño de una parcela, el IAF tiene el sentido físico de una medida aproximada de la superficie foliar verde por unidad de radiación disponible (Ramírez, 2013).

#### 2.4.2. Contenido de clorofila mediante el uso de SPAD y rendimiento

El crecimiento y rendimiento de las plantas están estrechamente relacionados con los factores ambientales y el manejo del cultivo. La cantidad, calidad y duración de la luz y de la temperatura, así como la fecha y densidad de siembra, la humedad del suelo y la fertilización química, en particular el nitrógeno, afectan la concentración de clorofila, la formación de biomasa y el rendimiento. La clorofila es el pigmento fotosintético primario de las plantas que junto con el nitrógeno foliar varían con la radiación solar (Mendoza *et al.*, 2006).

El contenido de clorofila juega un papel importante en las plantas cultivadas ya que esta positivamente correlacionado con la fotosíntesis, por tanto, la reducción en el contenido de clorofila puede ser considerada como una respuesta de las plantas al estrés. Esta reducción de la clorofila puede perjudicar el proceso

fotosintético conduciendo a una reducción en la fijación de carbono, de ahí la importancia de conocer el contenido en clorofila de las plantas cuando las condiciones medioambientales no son óptimas (Gonzales, 2009).

En trigo se han observado diferencias en la tasa de fotosíntesis neta entre cultivares a altas temperaturas y se ha visto que iba asociada con una bajada en la concentración de clorofila de la hoja durante el periodo de llenado de grano (Reynolds *et al.*, 2000).

En los últimos años se ha obtenido una relación más directa entre el contenido en clorofila de las hojas y el rendimiento en grano, al comprobar que la tasa de fotosíntesis neta está estrechamente asociada con la pérdida de clorofila durante el periodo de llenado de grano de los cereales. Además se ha observado la existencia de una asociación genética entre el contenido en clorofila y el rendimiento (Gonzales, 2009).

Fotovat *et al.*, (2007) dicen que la medición del contenido relativo de la clorofila con el SPAD, se ha propuesto en estudios de sequía como criterio para la selección de genotipos. Además, el contenido total de clorofila puede ser rápidamente determinado con el SPAD y sus valores presentan una correlación alta con los valores determinados mediante el método de extracción de clorofila a, b y total, así como con la eficiencia transpiratoria y con el área foliar específica en diferentes condiciones de humedad.

El medidor de clorofila SPAD 502 es un instrumento que permite evaluar indirectamente y en forma no destructiva el contenido de clorofila en la hoja y por ende, el estado nutricional del cultivo a través de una simple lectura. Las medidas de

clorofilas con el SPAD es un método interesante ya que es indicativo de la actividad fotosintética, al estar está relacionada con el contenido en clorofilas de las hojas (Castillo y Ligarreto, 2010).

En las plantas de maíz, el contenido de N foliar y el contenido de clorofila medido mediante el SPAD 502 están positivamente correlacionadas, excepto en los estados iniciales de desarrollo de maíz (Castillo y Ligarreto, 2010).

En estudios de la relación entre el contenido de clorofila de las hojas y los valores SPAD en trigo y cebada. Se observaron que el coeficiente de correlación entre los valores SPAD y el contenido en clorofila de las hojas fue muy significativo ( $p < 0.001$ ), tanto para los trigos como para las cebadas (Gonzales, 2001).

Los valores del SPAD al estadio V6 están relacionados con estado nitrogenado de las plantas. Sin embargo, Blackmer & Schepers (1995) han encontrado bajas correlaciones entre los valores del SPAD al estadio V6 y el rendimiento del cultivo de maíz, destacando que su uso como herramienta de diagnóstico en aquel estadio tiene un limitado potencial, y que este mejora en estadios fenológicos posteriores. Altas correlaciones entre los valores de lectura del SPAD al estadio R3-R4 y el rendimiento del cultivo de maíz también han sido informadas por Piekielek *et al.*, (1992).

Además de la disponibilidad de N, otros factores ambientales pueden afectar el contenido de clorofila en hojas de maíz. Dwyer *et al.*, (1991) reportaron un fuerte incremento en la concentración de clorofila en hojas de maíz cuando la temperatura aumentó de 16 a 23 °C.

### **2.4.3. Efecto del enrollamiento foliar en la planta de maíz**

Las características morfológicas o fisiológicas que reducen la pérdida de agua por transpiración, o aumentan la absorción de agua, pueden evitar la deshidratación. La cutícula gruesa, la sensibilidad estomática, el enrollamiento de las hojas, reducen la pérdida de agua, y un sistema radical profundo aumenta la absorción de agua. Hay gran número de características morfológicas que reducen la pérdida de agua. Los cambios en la orientación de las hojas, y el enrollamiento cuando se marchitan, reducen la carga de radiación recibida (Evans, 2010).

Algunas plantas cultivadas muestran cierta capacidad de adaptación a la sequía, por ejemplo, orientando las hojas para que no presenten la cara al sol (frijol) o enrollándolas como el maíz, (Avendaño *et al.*, 2008).

El enrollamiento foliar es uno de los mecanismos de reducción de la radiación interceptada como respuesta al estrés hídrico. Además de reducir la radiación interceptada por el cultivo, el enrollamiento foliar se menciona como un mecanismo de la reducción de la transpiración y por tanto de ahorro de agua en momentos de déficit hídrico (Avendaño *et al.*, 2008).

Jiang y Huang (2000) dicen que este tiene un aspecto benéfico, pero también un aspecto negativo. Al enrollarse las hojas demuestran un estrés hídrico bastante fuerte, y aquellas que no se enrollan pueden ser visualizadas como en buen estado hídrico. Sin embargo, el enrollamiento protege a la hoja contra un mayor estrés, ya que reduce la incidencia solar, mantiene las temperaturas más bajas y protege a la hoja contra la foto-oxidación, sin embargo, hay un costo de una menor asimilación y fotosíntesis.

Hernández en el 2013 dice, que el enrollamiento foliar durante situaciones de estrés hídrico disminuye la superficie de la hoja expuesta a la energía solar y, junto con el cierre de los estomas, disminuye la transpiración. Esto provocara una disminución de la entrada de CO<sub>2</sub> en las células (descenso de CO<sub>2</sub> intercelular) y una baja eficiencia en el uso de la luz, induciéndose un mecanismo de inactivación del sistema fotosintético. Por tanto el enrollamiento foliar será inversamente proporcional al contenido de clorofilas. Cuando la luz es intensa, además se produce una acumulación de carotenoides como respuesta adaptativa.

Este es muy sensible a cambios diurnos en déficit hídricos foliares y permite a la planta responder de forma rápida a periodos de alta demanda evaporativa y recuperarse rápidamente cuando la demanda evaporativa es menor (Zarco *et al.*, 2004).

Las medidas realizadas alrededor de medio día solar, cuando se observan las mayores diferencias de enrollamiento foliar entre tratamiento, mostraron que el enrollamiento foliar fue un mecanismo de respuesta al estrés hídrico durante el periodo de riego deficitario y que este proceso fue reversible: el cultivo se recupera en las fases en las que cesaba el riego deficitario (Zarco *et al.*, 2004).

Estudios de enrollamiento foliar (IR) en sorgo (Zarco *et al.*, 2004) mostraron que bajo suministro hídrico adecuado apenas se producía variaciones de IR a lo largo del día, mientras que en condiciones de estrés se producía una oscilación del IR a lo largo del día, con valores mínimos poco después del medio día solar y valores máximos al amanecer y anochecer.

Banziger *et al.*, en el 2012 dicen que el enrollamiento foliar presenta una heredabilidad que va de moderada a alta, y una relación con el rendimiento de grano de moderada a baja. Además recomiendan evaluar esta característica antes de la floración, cuando las hojas todavía están erectas; ya que después de la floración es menos probable que se enrollen por que se vuelven más laxas y gruesas. También recomiendan realizar de dos a tres evaluaciones.

#### **2.4.4. Senescencia foliar y rendimiento**

Las plantas son implacables recicladores de recursos y lo hacen empleando la senescencia y la muerte para la reasignación de recursos. Sus órganos fotosintéticos especializados, las hojas, hacen que la planta invierta mucha energía y nutrientes en la producción de las mismas. Después de un período fotosintético productivo, la contribución de fotosintatos de la hoja disminuye y entran en el último estadio del desarrollo: la senescencia (Cafaro, 2005).

Las plantas frecuentemente experimentan estrés, cuando las condiciones externas afectan negativamente el crecimiento, desarrollo, o productividad. Estos estreses pueden ser bióticos o abióticos, estos últimos producidos por un exceso o déficit en el hábitat físico o químico. Las condiciones de estrés inducen la senescencia foliar y en consecuencia, la re movilización de N y otros nutrientes (Cafaro, 2005).

La senescencia foliar es un proceso desencadenado tanto por factores ambientales como genéticos, particularmente a través de la producción de fitohormonas como las citocininas, etileno y ácido abscisico (ABA), que la aceleran o retrasan (Feller y Fischer, 1994).

Puede ocurrir naturalmente cuando un órgano o la planta entera ingresan en una determinada etapa fisiológica o puede ser inducida prematuramente debido a condiciones ambientales adversas (Hasperué, 2012).

Buchanan-Wollaston *et al.*, en 2003 sugieren que es una de las etapas finales del desarrollo de un vegetal o una parte del mismo. Habitualmente se puede evidenciar por el amarillamiento que sufren los órganos verdes a causa de la pérdida de clorofila. Esta transformación visible es acompañada por activos cambios metabólicos que resultan en la re movilización de nutrientes almacenados en los tejidos durante el desarrollo, para ser transferidos a otras partes de la planta. En consecuencia, el principal propósito de la senescencia en las plantas es la re movilización y reciclado de nutrientes.

La tasa de senescencia está altamente determinada por las condiciones ambientales y la actividad de la hoja está relacionada con la nutrición mineral (Salinas y Gonzales, 2002).

Los síntomas visibles de la senescencia se relacionan con la degradación de muchas macromoléculas complejas responsables de la apariencia de la planta. Un ejemplo de ellos es la pérdida de clorofila, que empieza típicamente en el margen de la hoja y progresa hacia el interior. (Cafaro, 2005).

La degradación de clorofila es el primer síntoma visible, pero al momento del amarillamiento, una gran parte del proceso ya fue llevado a cabo. La degradación de proteínas y de ARN ocurre paralelamente a la pérdida de la actividad fotosintética (Hasperué, 2012).

El control hormonal de la senescencia está dado por dos hormonas principales de acción antagónica: citocininas y etileno. Elevadas concentraciones de citocininas retrasan la senescencia, mientras que la presencia de etileno lo acelera (Hasperué, 2012).

Además del etileno y las citocininas, se ha demostrado que otras hormonas participan también en la regulación de la senescencia. El ácido jasmonico y el ácido abscisico son promotores mientras que las giberelinas tendrán un rol de inhibidores del proceso (Li *et al.*, 2010).

Durante la senescencia las concentraciones de algunas hormonas, tales como las citocininas, disminuyen en las plantas; sin embargo, otras como el etileno y el ácido abscisico (ABA) se incrementan, del mismo modo que cuando existe un déficit hídrico moderado. Los cambios en las concentraciones hormonales de las plantas son importantes porque son señales de comunicación en respuesta al ambiente entre la raíz y el tallo o viceversa (Salinas y Gonzales, 2002).

La senescencia es un proceso diferente a la necrosis, aunque las dos conducen a la muerte. La necrosis es la muerte debida a daños físicos, venenos u otras heridas extremas. Por el contrario, la senescencia es un proceso normal de desarrollo, dependiente de energía, que está controlado por el propio programa genético de la planta. Las hojas están genéticamente programadas para morir, y la senescencia se puede iniciar por factores ambientales (Pennell, 1997).

La senescencia como síntoma es también causada cuando las partes verdes de las plantas son removidas y almacenadas originando el amarillamiento pos

cosecha y la pérdida de nutrientes en los vegetales dando como resultado pérdidas económicas importantes (Buchanan-Wollaston *et al.*, 2003).

La etapa final de este proceso es la muerte del órgano en cuestión, aunque la misma es activamente retrasada de modo tal que la planta logre reciclar la máxima cantidad posible de nutrientes (Buchanan-Wollaston *et al.*, 2003).

Por otra parte, la senescencia es de interés económico porque afecta la producción de los cultivos, al reducir el área fotosintética activa, debido a la movilización de metabolitos hacia la demanda (Noodén y Guiamét, 1989). El inicio del llenado de grano coincide con el de la senescencia foliar. La tasa de senescencia está altamente determinada por las condiciones ambientales y la actividad de la hoja está relacionada con la nutrición mineral. Algunos estudios han demostrado que el N retrasa la pérdida de clorofila (Debata y Murty, 1983) y así se tiene una mayor duración de la actividad fotosintética.

El mantenimiento del índice de área foliar verde (*stay green*) ha sido un atributo asociado con menores caídas en el rendimiento ante situaciones de algún estrés tal como sequía (Bolaños y Edmeades, 1996). Valentinuz y Tollenaar (2004) encontraron diferencias en el progreso de los síntomas de senescencia entre híbridos de maíz con diferente tolerancia a estrés abiótico. Adicionalmente, Lafitte y Edmeades (1995) encontraron que híbridos seleccionados por tolerancia a sequía fueron también más tolerantes a un estrés de nitrógeno (N) y especularon que los mecanismos involucrados en la tolerancia a ambos tipos de estrés podrían ser comunes.

Banziger *et al.*, en el 2012 dicen que la senescencia foliar presenta una heredabilidad moderada, y una relación con el rendimiento de grano de moderada cuando hay estrés durante el llenado de grano. Y recomiendan evaluar esta característica en dos o tres ocasiones, dejando de 7 a 10 días entre una y otra, esto durante la última parte del llenado de granos.

#### **2.4.5. La viabilidad de polen y el rendimiento de grano**

Un estrés hídrico severo desde el fin de la etapa vegetativa en adelante puede generar un incremento en el intervalo entre la emisión de polen (floración masculina) y la aparición de estigmas (floración femenina). Esto puede generar que al momento de la aparición de los estigmas ya no haya polen en abundancia dando lugar a una polinización incompleta de las mazorcas. Los óvulos no fertilizados comienzan a desintegrarse y desaparecen antes de que la mazorca alcance la madurez fisiológica (Fonseca y Westgate, 2005).

La determinación de la viabilidad del polen y su importancia en estudios de la biología de la reproducción y mejoramiento genético de plantas, es fundamental para definir la dirección de una cruce y contar con bases para el éxito de hibridaciones controladas para garantizar la formación de nuevos híbridos e incrementar su viabilidad (Salles *et al.*, 2006).

La exitosa fertilización de los óvulos maduros requiere de polen viable que aterrice sobre estigmas receptivos (Fonseca y Westgate, 2005).

Existen dos partes básicas en el proceso de polinización. Primero, polen viable debe caer en los estigmas receptivos y, segundo las barbas deben sostener la formación de los tubos polínicos que permitan que los gametos masculinos se unan a los gametos femeninos dentro del óvulo (Fonseca y Westgate, 2005).

Prasad *et al.*, (2001) advierten que en varios cultivos, existen antecedentes de efectos directos de breves periodos de estrés térmico e hídrico en el desarrollo, funcionalidad y supervivencia de los órganos reproductivos. Por ejemplo, estudios en maní determinaron que las etapas más sensibles a las altas temperaturas se encuentran 4 días antes y durante anthesis, produciéndose una reducción en el número de frutos de 6% por cada °C por encima de 33°C, debido a pérdidas en la viabilidad de polen y disminuciones en el crecimiento del tubo polínico.

La viabilidad del polen declina con el aumento de las temperaturas. (Stone, 2001). Se ha demostrado que temperaturas arriba de los 35 a 38 grados, hacen perder la viabilidad del polen de maíz.

Una larga porción de polen maduro es usualmente liberado de las anteras del maíz a media mañana dependiendo de las condiciones ambientales (la apertura de las anteras ocurre una vez que éstas no poseen agua libre debido al rocío). Se necesita un mínimo de 100 granos de polen por centímetro cuadrado por día para una exitosa polinización en un campo de maíz. El polen puede perder viabilidad en unos pocos minutos si la temperatura del aire es muy alta (aproximadamente 40°C), y/o si la demanda evaporativa (déficit de presión de vapor) es muy alta. Los granos de polen contienen cerca de 60% de agua cuando son liberados y mueren si su contenido de agua desciende hasta aproximadamente 30% (Fonseca y Westgate, 2005).

La segunda parte de una fertilización exitosa es la formación del tubo polínico y la deposición de los gametos masculinos dentro del óvulo. Este proceso depende fuertemente de la parte femenina de la planta, ya que los estigmas son quienes aportan todos los nutrientes y agua necesarios para el crecimiento del tubo polínico (Fonseca y Westgate, 2005).

Dependiendo de la disponibilidad de agua y las condiciones ambientales, tomará desde sólo unas pocas horas hasta aproximadamente un día para que los tubos polínicos crezcan todo su camino hasta los óvulos. Cuando la planta de maíz se encuentra bajo condiciones severas de estrés por sequía, el crecimiento del tubo polínico es más lento y el potencial para una fertilización exitosa decrece. Debido a que el número de granos por unidad de superficie está fuertemente asociado al rendimiento en grano, el estrés alrededor de floración genera las más importantes caídas de rendimiento. Es por ello que a este período alrededor de floración se lo conoce como período crítico para la determinación del rendimiento (Fonseca y Westgate, 2005).

#### **2.4.6. Madurez fisiológica como indicador de cosecha**

La etapa de madurez fisiológica se caracteriza por que todos los granos de la mazorca han alcanzado el máximo peso (máxima acumulación de materia seca), además de que la capa dura de almidón ha avanzado completamente hacia el marlo y se ha formado la capa negra (zona de abscisión) y el contenido promedio de humedad de los granos es de 30-35% (Mazzilli, 2012).

Valdivia (2011), dice que se entiende por madurez fisiológica, cuando el grano está completamente maduro, es decir, la semilla se independiza de los

nutrientes suministrados por la planta. Es el momento en que la semilla tiene su máxima calidad biológica expresada como:

- a) Mayor acumulación de materia seca.
- b) Mayor sanidad.
- c) Máximo porcentaje de germinación.
- d) Excelente vigor de plántula.
- e) El proceso de deterioro de la semilla es mínimo.

Después de la octava semana de la polinización el grano tiene el mayor nivel de materia seca (tiene un 35% de humedad) y es cuando llega a la madurez fisiológica, según pierde humedad se va acercando a la madurez comercial y en esto influyen las condiciones ambientales (Pavón, 2013).

El llenado de grano y la maduración ocurren en los últimos 50 a 60 días del ciclo de vida de la planta. Temprano en este periodo cualquier clase de estrés severo sobre el cultivo puede reducir el rendimiento final por más de 3-4% por día, con la reducción siendo menor a medida que las plantas se aproximan a su madurez fisiológica (aparición de la “capa negra”). Si una condición desfavorable mata el cultivo prematuramente, 10 días a 14 días antes de madurez fisiológica, se puede esperar una reducción en la producción de 4-5%, si este muere 21 días antes de la madurez fisiológica se pueden esperar pérdidas entre un 10-20%, con una considerable reducción en la calidad del grano. Si el cultivo es drásticamente afectado por algún estrés 30 días antes de madurez, el rendimiento de grano se reduce entre un 35-50% y el grano conseguido probablemente pierde precio (Campuzano y Navas, 2014).

En estudios realizados por Llera y Cruz (2014), en triticale, se encontró que el rendimiento de grano está relacionado positiva y significativamente con el intervalo

entre siembra y madurez fisiológica ( $R^2=0,8701$ ), pero establece una relación casi perfecta con los grados día desde siembra hasta madurez fisiológica ( $R^2=0,9988$ ), siendo esta positiva y altamente significativa.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Localización geográfica y características del área de estudio**

El municipio de Tlaltizapán se ubica en el estado de Morelos, entre los paralelos 18°41' de latitud norte y los 99°07' de longitud oeste, a una altura de 945 metros sobre el nivel del mar, colinda con los municipios de Emiliano Zapata y Yautepec al norte, con Ayala al este, con Tlaquiltenango al sur, con Zacatepec al suroeste y con Xochitepec y Puente de Ixtla al oeste.

El municipio tiene un clima subtropical y húmedo caluroso con invierno poco definido, con la mayor sequía al final del otoño, invierno y principios de primavera. La temperatura media anual es de 23.5 °C con una precipitación pluvial de 840 milímetros anuales y el periodo de lluvias es de junio a octubre.

#### **3.2. Ubicación del lote experimental**

El trabajo se llevó a cabo en la estación experimental del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) ubicado en Tlaltizapán, Mor. Anteriormente descrito, durante el ciclo de siembra primavera de 2014.

#### **3.3. Material genético**

Se utilizaron 16 genotipos procedentes del programa de fisiología de maíz del CIMMYT. Se obtuvieron de un bulk de los mejores germoplasma sometidos anteriormente en ensayos con condiciones de estrés por calor, sequía y sequia-calor. Los mejores germoplasma se han seleccionado y se establecerán para efectuar el ensayo.

Cuadro 3.1. Presentación de los 16 genotipos evaluados en el ensayo, en los tres niveles de sequía: riego normal, riego intermedio, riego restringido, 2014.

<b>No. DE GENOTIPO</b>	<b>ORIGEN</b>	<b>No. DE GENOTIPO</b>	<b>ORIGEN</b>
1	DTMA-179	9	LPSC7F64
2	DTMA-237	10	DTMA-184
3	DTMA-238	11	DTMA-145
4	DTMA-85	12	DTMA-235
5	CML247/CML254	13	DTMA-209
6	DTMA-155	14	DTMA-287
7	DTMA-60	15	DTMA-125
8	DTMA-207	16	DTMA-44

### 3.4. Diseño experimental

Se utilizó un diseño de randomización en bloques incompletos; se establecieron tres tratamientos (niveles de humedad) con tres repeticiones por cada uno de ellos, con 16 genotipos por repetición. La parcela experimental consistió en dos surcos de 4.5 m de longitud cada uno con una separación entre surco de 0.75 m y de 0.20 m entre planta y planta.

### 3.5. Descripción de tratamientos

En el experimento se establecieron los siguientes tratamientos.

Tratamiento 1. Riego Normal: para este tratamiento además del riego de germinación se realizaron ocho riegos durante el ciclo en los días 27, 59, 78, 94, 104, 112, 127 y 133 después de la siembra con una duración de 10 horas por cada uno de ellos.

Tratamiento 2. Riego Intermedio: en este tratamiento se aplicó un nivel de estrés intermedio, dicho estrés inicio inmediatamente antes del inicio de la floración. Para lograr esto se aplicaron siete riegos durante el ciclo en los días 27, 59, 78, 94, 104, 112 y 127 después de la siembra, con una duración de cinco horas cada uno de ellos a excepción del primero (día 27) que duro ocho horas.

Tratamiento 3. Riego Reducido: al igual que en riego intermedio, la restricción del riego inició antes de la floración, para ello se aplicaron únicamente cuatro riegos en los días 27, 59, 94 y 112 después de la siembra. Estos riegos tuvieron duraciones variadas de ocho, cinco, cuatro y tres horas respectivamente.

Para determinar el momento y la duración del riego se realizaron muestreo de humedad mediante ayuda de sensores especializados (PR2 y HH2 “Delta-T Devices”) ubicados estratégicamente en los ensayos que indicaban el estado de humedad del suelo a diferentes profundidades (100, 200, 400, 600 y 1000 mm).

### **3.6. Manejo agronómico**

#### **3.6.1. Preparación del terreno**

La preparación del terreno se realizó días antes de la siembra y consistió en;

Barbecho: Se realizó un barbecho entre 30-35 cm de profundidad para aflojar el suelo y permitir obtener mayor retención de humedad, aireación, además de incorporar al suelo residuos de cosecha anterior.

Rastreo: se efectuó un paso de rastra por el terreno con la finalidad de eliminar los terrones que quedan del barbecho y mantener el campo libre de maleza.

Trazo de los surcos: se trazaron surcos a lo largo del terreno de 0.75 m de distancia entre cada uno de ellos.

Marcado del terreno: el día anterior a la siembra se realizó el marcado de terreno con yeso, para delimitar el tamaño de cada parcela experimental y realizar una siembra más precisa.

### **3.6.2. Siembra**

La siembra se realizó el día 19 de Noviembre del 2013, en seco y en surcos dobles, esta se efectuó manualmente colocando dos semillas por punto de siembra con una separación de 0.20 m entre golpe y golpe para obtener un total de 23 golpes por surco.

### **3.6.3. Instalación del sistema de riego**

Se realizó la instalación de mangueras con goteros como sistema de riego, inmediatamente después de terminar la siembra. La instalación de la manguera se efectuó de manera manual para los tres tratamientos.

#### **3.6.4. Instalación de tubos para tomas de humedad y tomas de humedad**

Se colocaron tubos de fibra de vidrio para las tomas de humedad, se distribuyeron estratégicamente en el terreno para tener presencia de estos en los tres tratamientos. Se procedió a tomar la humedad del suelo en los tres tratamientos (riego normal, riego intermedio y riego restringido) por medio del sensor de humedad PR2 y HH2 "Delta-T Devices", dichas tomas se realizaron tres veces por semana (Lunes, Miércoles y Viernes) durante todo el ciclo del cultivo hasta la cosecha.

#### **3.6.5. Aclareo de plantas**

El aclareo de plantas se realizó 15 días posterior a la siembra, previo a la primer toma de Green Seeker, para esto se quitaron plantas en los puntos donde germinaron las dos semillas sembradas dejando un total de 23 plantas por surco a 0.20 m entre plantas en los 4.5 m del surco para lograr una densidad de población de 68, 000 plantas por hectárea.

#### **3.6.6. Fertilización**

La fertilización se realizó bajo la recomendación 80-70-22 y esta se llevó a cabo en dos momentos. La primera aplicación se realizó días antes a la siembra y la segunda a los 35 días después de ocurrida esta. Como fuente de nitrógeno se usó UREA (46-0-0), en tanto para el fosforo y potasio fue utilizado fosfato Mono potásico (0-52-34).

### 3.6.7. Riegos

Debido a que la base para la realización de este experimento son los niveles de humedad se realizó diferente cantidad de aplicaciones de riegos para cada tratamiento así como su fecha y duración en horas. La etapa en que se sometieron a estrés los tratamientos dos y tres fue antes de ocurrida la floración, cuando se observa la hoja bandera en la mayoría de las plantas, por lo que el riego de germinación y el primer riego de auxilio es igual para los tres tratamientos. La fecha de los riegos así como su duración se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.2. Momento de aplicación y duración en horas de cada uno de los riegos en los diferentes tratamientos, 2013-14.

Fecha	DDS	RN (horas)	RI (horas)	RR (horas)
<b>22-Nov-2013</b>	3	11	11	11
<b>16-Dic-2013</b>	27	8	8	8
<b>17-Ene-2014</b>	59	10	5	5
<b>5-Feb-2014</b>	78	10	5	--
<b>21-Feb-2014</b>	94	8	5	4
<b>3-Mar-2014</b>	104	10	5	--
<b>11-Mar-2014</b>	112	10	5	3
<b>26-Mar-2014</b>	127	10	5	--
<b>1-Abr-2014</b>	133	10	--	--

DDS: Días después de la siembra. RN: Riego normal. RI: Riego intermedio. RR: Riego reducido.

### **3.6.8. Control de plagas**

Para el control de plagas que afectan al cultivo del maíz, principalmente el gusano cogollero, además de algunas otras que causan problemas a la emergencia, se realizó una aplicación pre emergente de insecticida granulado distribuido homogéneamente en todo el terreno.

Durante el desarrollo del cultivo se detectó la presencia de gusano alfilerillo (*Diabrotica virgifera zea*) y se realizó aplicación de insecticida cipermetrina en los días 10 y 16 después de la siembra.

Otra plaga importante que afecto el cultivo fue el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), para el control de esta plaga se realizó una aplicación de insecticida granulado POUNCE (permetrina) el día 14 de enero del 2014, 56 días después de la siembra.

Una plaga menos importante que afecto también el ensayo fue la chicharrita del maíz (*Dalbulus maidis*), para la eliminación de esta se efectuó una aplicación de jabón como control orgánico.

Para tomar la decisión del momento de aplicar un producto de control se realizaba inspección del experimento recorriéndolo cotidianamente para la detección de posibles infestaciones de plagas y daños visibles en las plantas.

### **3.6.9. Control de maleza**

El control de maleza se realizó de manera manual, inmediatamente al momento de su aparición, la presencia de maleza influye en el desarrollo del cultivo al competir con este, también es un problema al realizar las mediciones de NDVI debido a que el Green Seeker mide todo lo verde y al tener presencia de maleza este arrojaría datos falsos que afectarían en las correlaciones realizadas.

### **3.7. Variables determinadas**

Para una mejor evaluación de los genotipos utilizados en estas condiciones, se llevaron a cabo la toma de variables agronómicas como: días a floración femenina (FF), días a floración masculina (FM), altura de planta (AP), altura de mazorca (AM), acame de tallo (AT), acame de raíz (AR), cobertura de mazorca (CobM), número de plantas (NP), número de mazorcas (NM), peso de grano (PG), humedad de grano (HG).

También variables fisiológicas como enrollamiento, senescencia, NDVI, contenido de clorofila (SPAD), porometría, viabilidad de polen y madurez fisiológica.

Para el presente trabajo se tomaron las siguientes variables fisiológicas, para utilizar los datos obtenidos de ellas y una vez conociendo el rendimiento de grano hacer las correlaciones correspondientes con este, además de seguir más a detalle el comportamiento de los genotipos sometidos a estrés hídrico.

### **3.7.1. Estimación de la cobertura vegetal (NDVI)**

La medición de esta variable fue principalmente para estimar y evaluar el estado de salud de las plantas de maíz en base a la medición de la radiación que estas emitían o reflejaban al estar sometidas a estrés hídrico. Dicha estimación se realizó mediante el uso de un sensor portátil “Green Seeker” que mide el índice de vegetación diferencial normalizado, gracias a la reflexión que provoca la presencia de clorofila en el tejido vegetal en el infrarrojo cercano y el rojo.

Se realizaron en total ocho tomas para el tratamiento de riego normal y siete para los tratamientos en riego intermedio y reducido, distribuidas de la siguiente manera:

Las primeras cuatro tomas se realizaron en estado vegetativo de la planta por lo tanto fueron como sigue; la primer toma se realizó el día 10 de diciembre a los 21 DDS, la segunda toma fue llevada a cabo el día 24 de diciembre a 35 DDS, para la tercer toma el dato se tomó el día 3 de enero 45 DDS, la cuarta toma se efectuó el día 8 de enero a 50 DDS.

Las restantes cuatro tomas se realizaron en etapa reproductiva es decir después de floración y fueron como sigue; la primer toma fue el día 19 de febrero a 92 DDS, la segunda toma se realizó el día 5 de marzo cuando habían transcurrido 106 DDS, la tercer toma y ultima para los tratamientos dos y tres fue el día 19 de marzo a 120 DDS, y la cuarta toma solo para el tratamiento uno (Bien regado) se efectuó el día 2 de abril cuando ya tenía 134 DDS.

### **3.7.2. Contenido de clorofila (SPAD)**

Esta variable se tomó mediante el medidor de clorofila SPAD 502 que es un instrumento que permite evaluar indirectamente y en forma no destructiva el contenido de clorofila en la hoja que está estrechamente relacionada con la concentración de N y por ende, el estado nutricional del cultivo a través de una simple lectura, por medio de la luz transmitida a través de esta en 650nm (longitud de onda fotosintéticamente activa) y 940nm.

Las lecturas fueron en ocho plantas por parcela útil seleccionadas previamente, de ellas se seleccionó la hoja donde va insertada la mazorca principal de la planta para de aquí realizar la toma. Las hojas seleccionadas fueron marcadas en la parte que se encuentra en el borde y el nervio medio para realizar la toma siempre en la misma parte de esta.

Se realizaron cuatro tomas para los tratamientos uno y dos y tres para el tratamiento tres, debido a que en este último la senescencia foliar se aceleró y no fue posible realizar la cuarta toma, las tomas fueron realizadas como sigue: la primera toma se efectuó el día 11 de febrero a 84 DDS, la segunda toma fue llevada a cabo el día 25 de febrero 98 DDS, la tercera toma fue realizada el día 11 de marzo a 112 DDS y la cuarta y última toma solo para los tratamientos uno y dos fue el día 25 de marzo cuando habían transcurrido 126 DDS.

La razón de las fechas de las tomas fue que estas habían sido programadas para realizarse 2, 4, 6 y 8 semanas después de que ocurrió la floración tanto masculina como femenina.

### 3.7.3. Enrollamiento foliar

Se evaluó el grado de enrollamiento que presentan las plantas debido al estrés hídrico, se utilizó una escala del uno al cinco, uno cuando no hay enrollamiento y cinco cuando se enrolla la hoja como si fuera de cebolla.

Cuadro 3.3. Escala para medir enrollamiento foliar y característica de identificación en campo

ESCALA	CARACTERÍSTICA
1	Hoja turgente.
2	Las orillas de la hoja se empiezan a enrollar.
3	La hoja tiene forma de V.
4	Las orillas de la hoja se enrollan y cubren parte de la lámina foliar.
5	La hoja se enrolla como si fuera cebolla.

Fuente: Banziger *et al.* 2012.

La toma se realizó con la floración al 50%, efectuando dos tomas por semana durante tres semanas (Seis tomas en total), esto fue únicamente en los tratamientos de riego deficitario, es decir el dos y tres.

### 3.7.4. Senescencia foliar

Se evaluó para identificar los materiales que retrasan la senescencia foliar y de esta manera observar cuales son más tolerantes a estrés hídrico.

La evaluación fue realizada utilizando una escala del uno al diez. El porcentaje estimado de la superficie foliar total que ha muerto, se divide entre diez. La escala de acuerdo al porcentaje foliar muerto se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.4. Escala de medición de senescencia foliar y porcentaje de área foliar que ha muerto respectivamente

<b>Escala</b>	<b>Área foliar muerta</b>	<b>Escala</b>	<b>Área foliar muerta</b>
1	10%	6	60%
2	20%	7	70%
3	30%	8	80%
4	40%	9	90%
5	50%	10	100%

Fuente: Banziger *et al.* 2012.

La evaluación se realizó en tres ocasiones, dejando 15 días entre una y otra iniciando dos semanas después de que la floración se encuentra al 50%. Esta variable se tomó únicamente en los tratamientos de riego deficitario.

### **3.7.5. Determinación del intervalo polen-estigma (ASI)**

Este parámetro fue evaluado para cuantificar la diferencia en días transcurridos entre la ocurrencia de la floración masculina y la femenina.

Para determinar esto, en la etapa en que ocurrió la floración tanto masculina como femenina, se tomó el número de días que habían transcurrido desde la siembra hasta este momento y se capturo en la etiqueta que identificaba

el plot, posteriormente a los días a floración femenina se le resto la floración masculina y se capturo el dato resultante.

### **3.7.6. Viabilidad de polen**

Para la toma de esta variable, cuando las plantas se encontraban en estado vegetativo se seleccionaron ocho plantas por parcela útil lo más homogéneamente posible, estas plantas se monitorearon diariamente para registrar el momento en que iniciaban a emitir polen, una vez que esto ocurría se dejaban pasar dos días para iniciar la colecta de polen, con la finalidad de que al momento de realizar esta se contara con la mayor cantidad de polen posible.

La colecta de polen se realizaba en cajas petri preparadas previamente con agar, se tomaban dos muestras de polen diarias por planta seleccionada, dos veces por día.

La primera a las 9:00 de la mañana y la segunda a las 2:00 de la tarde durante dos días consecutivos a partir del segundo día de iniciada la floración. En total se realizaban cuatro tomas por planta seleccionada.

Una vez obtenidas las muestras de polen se observaban en microscopio para contar el número total de granos de polen colectados y el número de estos que emitían el tubo polínico, tomando como hecho que al emerger este, los granos manifestaban ser viables. La realización de ambos conteos se hacía para determinar en base a porcentajes la viabilidad del polen colectado y en consecuencia del genotipo evaluado.

### **3.7.7. Madurez fisiológica**

La madurez fisiológica es la etapa en que el grano ha alcanzado el máximo en absorción de nutrientes y se caracteriza por que todos los granos tienen el mayor peso posible, además de que la capa de almidón ha avanzado completamente y se ha formado la capa negra, y el contenido promedio de humedad es de 30-35%.

La toma de esta variable se realizó cuando las plantas manifestaban cierto grado de senescencia y se llevaba a cabo tomando muestras de grano de tres plantas por parcela útil (plot) durante varios días hasta que el grano presentaba la denominada capa negra.

La identificación de la capa negra sirvió como parámetro para determinar el momento óptimo de la cosecha ya que la capa negra es también conocida como zona de abscisión y esto se interpreta como que el grano se ha independizado de la planta y ya no es necesario que siga en el campo.

### **3.7.8. Cosecha**

La cosecha se llevó a cabo en diferente fecha para cada tratamiento debido a que el estrés aceleró el ciclo del cultivo y se tomó como punto de referencia para cosecha la madurez fisiológica, debido a esto se inició por cosechar el tratamiento tres, el día nueve de abril 141 DDS, el segundo tratamiento en ser cosechado fue el dos, el día 23 de abril cuando habían transcurrido 155 DDS y finalmente se cosechó el tratamiento uno, el día 28 de abril a 160 DDS.

La cosecha se realizó de manera manual dejando sin cosechar las plantas marcadas que fueron utilizadas para tomar viabilidad de polen debido a que serían utilizadas para toma de datos individuales.

Las mazorcas cosechadas se acomodaron en la entrada de la parcela para realizar conteo de estas y así también contar las que presentaban pudrición.

### 3.7.9. Rendimiento de grano

El rendimiento se determinó a través de la producción de grano en cada una de la parcela útil, ésta se pesó y se ajustó con el % de humedad de cada uno de los Híbridos, reflejada en  $\text{kg ha}^{-1}$ , posteriormente este dato fue transformado a  $\text{t ha}^{-1}$ . La fórmula utilizada es la presentada por (Morales, 1993).

$$\frac{Kg}{Ha} = (PeCa * Kd) \left( \frac{100 - Hc}{86} \right) \left( \frac{10000}{AU} \right)$$

Donde;

PeCa= Peso de campo de las mazorcas cosechadas por parcela útil en Kg.

Kd= Índice de desgrane para ajustar el rendimiento de grano.

AU= Área de Parcela útil.

HC= Humedad de campo u de cosecha.

### 3.7.10. Análisis estadístico

Todos los datos tanto de análisis y ajustes, así como los coeficientes de correlación lineal fueron analizados con el programa computacional Excel, así mismo para el ANOVA fue utilizado el paquete de análisis estadísticos SAS.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis de varianza

Para comparar e identificar las diferencias existentes entre genotipos, tratamientos y la interacción genotipo por tratamiento se realizó análisis de varianza utilizando como nivel de probabilidad el 0.001. En el cuadro 4.1 el análisis de varianza combinado de los tres tratamientos evaluados (RN, RI, RR) y muestra la significancia de los cuadrados medios de las 17 variables evaluadas en el ciclo “A 2014” en el CIMMYT.

Para los genotipos se muestra diferencia altamente significativa ( $p \leq 0.001$ ) para las variables rendimiento (REND), floración masculina (ANTH), intervalo polen-estigma (ASI), madurez fisiológica (MF), llenado de grano (GF), viabilidad de polen en el día uno a las nueve de la mañana (PV1\_9), viabilidad de polen en el día uno a la una de la tarde (PV1\_13), SPAD1, SPAD3, enrollamiento foliar uno, dos y tres (LR1, LR2, LR3), mientras que para la variable NDVI, se presenta diferencia altamente significativa ( $p \leq 0.01$ ), así mismo se observa que existe diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ), para las variables viabilidad de polen del segundo día a las 9 de la mañana (PV2\_9) y SPAD2.

Por su parte la variable de viabilidad de polen del segundo día a la una de la tarde (PV2\_13) no presente diferencias entre genotipos.

Lo anteriormente descrito muestra claramente que existen diferencias entre los genotipos al detectarse estas en 16 de 17 variables evaluadas. Estas diferencias

pueden ser atribuidas al origen y al proceso de mejoramiento del que han sido parte cada una de ellas.

En el caso de los tratamientos existen diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.001$ ) para las variables REND, NDVI, SEN, ANTH, ASI, MF, GF, PV1\_9, PV1\_13, PV2\_9, PV2\_13, SPAD1, SPAD2, SPAD3, Y LR1. Por su parte se observa diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) en la variable LR3 y no se detecta diferencia en la variable LR2.

En el caso de esta variable que no presenta diferencia "LR2" se puede destacar que la ausencia de esta es debido a que en el momento del registro se estaba aplicando riego en los tres tratamientos y el efecto de enrollamiento fue minimizado a causa de ello. Esto es avalado por Zarco *et al.* (2004) que dicen que el enrollamiento foliar es un mecanismo de respuesta al estrés hídrico durante el periodo de riego deficitario y que este proceso fue reversible: el cultivo se recupera en las fases en las que cesaba el riego deficitario.

Por lo observado en este análisis se puede afirmar que al igual que en genotipos también existe diferencia entre tratamientos al presentarse estas en 17 de 18 variables evaluadas, lo que sugiere que la sequía si afecto en gran medida al óptimo desarrollo de las plantas.

Por su parte en la interacción genotipo por tratamiento los cuadrados medios muestran diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.001$ ) en las variables REND y ASI, así mismo se muestran diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) para las variable PV1\_13 y LR3, también se encontró diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) en el caso de ANTH, SPAD2 y SPAD3, lo que indica que existen genotipos que se asocian mejor a

cierto tipo de ambiente lo que le permite expresar de mayor manera sus características y esto repercute en gran medida en el rendimiento.

De igual manera se observa que el ASI es una de las variables con mayor diferencia en esta interacción, esto debido a que según Fisher *et al.* (1989), la elongación de los estambres es muy sensible al contenido de agua de la planta y al abastecimiento de materia asimilada y el estrés antes de la floración puede aumentar el intervalo entre la antesis y la aparición de los estambres.

Esto es posiblemente la causa de las diferencias en esta variable ya que al ocurrir esto provoca que no se lleve a cabo una polinización adecuada lo que representa graves consecuencias para el rendimiento.

Por otro lado se detecta que las características secundarias con diferencia significativa en esta interacción son por orden de importancia ASI, PV1\_13, LR3, ANTH, SPAD2, Y SPAD3, lo que sugiere que estas son las características de mayor relevancia que repercuten en el rendimiento por lo que sería recomendable estudiarlas más a fondo en ensayos de sequía porque pueden ser clave en el mejoramiento para tolerancia a este tipo de estrés.

Cuadro 4.1. Significancia de cuadrados medios de 17 variables registradas en 16 genotipos experimentales evaluados en tres niveles de riego. CIMMYT 2014.

FV	REND	NDVI	SEN	ANTH	ASI	MF	GF	PV1_9	PV1_13
GEN	137.14***	780.5**	46449***	45142***	37.22***	175107***	31504.3***	9727***	23924***
TRAT	351.44***	16.12***	5244***	10***	32.876***	5132***	4249.6***	46815***	52811***
GEN*TRAT	2.14***	0.26	113	2*	2.241***	14	35.7	460	513**
FV	PV2_9	PV2_13	SPAD1	SPAD2	SPAD3	LR1	LR2	LR3	
GEN	15414*	5621.9	11227.2***	6035.2*	6095.2***	58.385***	59.823***	68.01***	
TRAT	36398***	5463.5***	1638.2***	8764***	14635.6***	5.51***	0.844	1.76*	
GEN*TRAT	397	181.1	10	34.9*	36.1*	0.31	0.244	0.694**	

\*, \*\*, \*\*\* valores significativos al .05, .01, .001 de probabilidad, REND=rendimiento, NDVI=índice de vegetación diferencial normalizada, SEN=senescencia foliar, ANTH=días a floración masculina, ASI=intervalo polen-estigma, MF=madurez fisiológica, GF=llenado de grano, PV1\_9=viabilidad de polen en el día uno a las nueve de la mañana, PV1\_13=viabilidad de polen en el día uno a la una de la tarde, PV2\_9=viabilidad de polen en el día dos a las nueve de la mañana, PV2\_13=viabilidad de polen en el día dos a la una de la tarde, SPAD1=contenido de clorofila 15 días después de floración, SPAD2=contenido de clorofila 30 días después de floración, SPAD3=contenido de clorofila 45 días después de floración, LR1= enrollamiento foliar una semana después de floración, LR2=enrollamiento foliar dos semanas después de floración, LR3=enrollamiento foliar tres semanas después de floración.

#### 4.2. Promedios de características secundarias de 16 genotipos de maíz, evaluadas en tres niveles de riego, CIMMYT 2014.

En los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan las medias de rendimiento (REND) y demás variables evaluadas en 16 híbridos experimentales de maíz en los tratamientos de riego normal, riego intermedio y riego reducido respectivamente.

En el tratamiento de riego normal (cuadro 4.2) se observa que sobresale el híbrido DTMA 155 por su capacidad rendidora al presentar una producción de 9.11 t ha<sup>-1</sup> seguida por los híbridos DTMA 60 con 8.74 t ha<sup>-1</sup>, DTMA 179 que presenta 8.5 t ha<sup>-1</sup>, y el híbrido DTMA 145 con 8.24 t ha<sup>-1</sup>, siendo estas estadísticamente iguales en cuanto a este parámetro.

Además de ser estos muy semejantes en las características evaluadas y presentar en general valores mayores de NDVI, ANTH, MF, y SPAD4 que los demás híbridos en estudio, por lo que se puede inferir que estas son las características de

mayor relevancia registradas que contribuyen a un buen rendimiento en condiciones óptimas de riego y fertilización.

En el caso del tratamiento de riego intermedio (cuadro 4.3) destacan por rendimiento los híbridos DTMA 85, DTMA 209, y DTMA 237 con rendimientos de 7.43, 6.75 y 6.72 t ha<sup>-1</sup> respectivamente, rendimientos que son muy similares y en uno de los casos (DTMA 237) superior a los mostrados en el tratamiento de riego normal, lo que indica una gran capacidad de tolerancia a sequía por parte de estos materiales.

Así también se observa que estos materiales son muy similares en cuanto a las características evaluadas y se detecta que estos mantienen un nivel superior en cuanto a contenido de clorofila en las tomas de SPAD1 respecto al resto de los híbridos y a su vez es menor el valor de ASI y de enrollamiento foliar en su segunda toma y esto puede estar causando muy probablemente el elevado rendimiento.

Para el tratamiento de riego reducido (cuadro 4.4) los híbridos con mayores rendimientos son DTMA 287, DTMA 209 y DTMA 237 con 3.94, 3.42 y 3.39 t ha<sup>-1</sup> respectivamente y se destacan por ser los únicos que superaron las 3 t ha<sup>-1</sup> en este tratamiento, así también dos de estos híbridos (DTMA 237 y DTMA 209) resultaron ser de los mejores en el tratamiento de riego intermedio por lo cual es claro que estos presentan características que tienden a tolerar la sequía.

En el caso de este tratamiento las variables que se pueden destacar como las que producen los mayores rendimientos bajo estrés son; la floración masculina, el ASI y la madurez fisiológica ya que en el caso de la primera y la tercera se observa que son más precoces y por ello tal vez obtienen mayor rendimiento al permanecer menor tiempo bajo estrés y para el caso del ASI en estos materiales presenta un valor muy bajo, de cero en uno de los casos, y al ocurrir esto se fomenta una buena polinización y esto se ve reflejado en mayores rendimientos.

Cuadro 4.2. Valores medios de 14 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego normal. CIMMYT 2014.

<b>GENOTIPO</b>	<b>REND</b>	<b>NDVI</b>	<b>ANTH</b>	<b>ASI</b>	<b>MF</b>	<b>GF</b>	<b>PV1_13</b>
<b>DTMA 155</b>	9.11	14.23	78	2	151	71	41.77
<b>DTMA 60</b>	8.74	14.42	73	1	150	76.67	33.73
<b>DTMA 179</b>	8.5	14.02	80	2	153	71	36
<b>DTMA 145</b>	8.24	13.76	78	1	152	73.33	36.4
<b>DTMA 85</b>	8.07	14.31	77	-1	149	73.33	38.53
<b>DTMA 207</b>	7.99	14.41	72	2	150	75	56.27
<b>DTMA 287</b>	7.93	13.71	72	1	146	73	68.67
<b>DTMA 44</b>	7.68	14.15	73	1	148	74.33	33.53
<b>CML247/CML254</b>	7.63	14.24	75	1	152	75.33	31.67
<b>DTMA 209</b>	7.58	13.07	73	0	146	73.33	46.93
<b>DTMA 238</b>	7.56	14.22	73	1	149	74.67	51.4
<b>DTMA 184</b>	7.35	14.25	69	2	144	73.67	49.47
<b>LPSC7F64</b>	7.35	14.1	83	1	151	66.67	57.07
<b>DTMA 235</b>	7.05	13.87	73	3	148	73	59.7
<b>DTMA 125</b>	6.4	13.95	73	2	145	69.67	45.8
<b>DTMA 237</b>	6.3	13.39	74	1	148	73	44.77
<b>MEDIA GRAL</b>	7.72	14.01	75	1	149	72.94	45.73
<b>LSD</b>	0.87	0.62	1.95	1.15	4.59	4.49	14.32
<b>GENOTIPO</b>	<b>PV1_9</b>	<b>PV2_13</b>	<b>PV2_9</b>	<b>SPAD1</b>	<b>SPAD2</b>	<b>SPAD3</b>	<b>SPAD4</b>
<b>DTMA 155</b>	27.47	8.99	27.73	51.6	52.8	48.3	44.3
<b>DTMA 60</b>	32.54	6.84	24.53	47.8	48.9	44.9	40.1
<b>DTMA 179</b>	36.78	7.65	32.27	50.1	51.1	43.4	37
<b>DTMA 145</b>	27.21	6.85	29.1	52.6	53.5	48.3	39.9
<b>DTMA 85</b>	34.09	9.83	32.57	53.1	51.4	44	36
<b>DTMA 207</b>	42.73	7.13	36.17	53.1	54.8	51.1	41.8
<b>DTMA 287</b>	30.44	8.5	35.57	48.7	51.3	40.6	31.9
<b>DTMA 44</b>	50.96	8.05	25.67	52.5	54.6	47.8	40.4
<b>CML247/CML254</b>	31.64	6.34	24.93	48.3	47.7	41.1	33.8
<b>DTMA 209</b>	33.49	8.23	36.37	52.5	53.6	48.5	38.5
<b>DTMA 238</b>	43.14	7.3	30.6	53.8	53.7	48.4	36.4
<b>DTMA 184</b>	46.6	8.38	28.23	47.5	51.1	42.7	33.9
<b>LPSC7F64</b>	51.54	12.13	36.5	47.8	46	44.7	38.5
<b>DTMA 235</b>	61.15	7.77	37.87	46.5	48.4	45.5	33.4
<b>DTMA 125</b>	34.81	5.92	26.7	46.7	46.6	42.4	32.5
<b>DTMA 237</b>	39.94	6.48	26.6	50.8	53.2	45.5	38.6
<b>MG</b>	39.03	7.90	30.71	50.21	51.17	45.45	37.31
<b>LSD</b>	13.83	1.95	12.49	3.47	3.41	5.78	8.50

MG=media general, LSD=diferencia mínima significativa, REND=rendimiento, NDVI=índice de vegetación diferencial normalizada, ANTH=días a floración masculina, ASI=intervalo polen-estigma, MF=madurez fisiológica, GF=llenado de grano, PV1\_9=viabilidad de polen en el día uno a las nueve de la mañana, PV1\_13=viabilidad de polen en el día uno a la una de la tarde, PV2\_9=viabilidad de polen en el día dos a las nueve de la mañana, PV2\_13=viabilidad de polen en el día dos a la una de la tarde, SPAD1=contenido de clorofila 15 días después de floración, SPAD2=contenido de clorofila 30 días después de floración, SPAD3=contenido de clorofila 45 días después de floración, SPAD4=contenido de clorofila 60 días después de floración.

Cuadro 4.3. Valores medios de 18 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.

GENOTIPO	REND	NDVI	ANTH	ASI	MF	GF	PV1_13	PV1_9	PV2_13
DTMA 85	7.43	15.38	76	1	145	68	35.97	39.1	7.58
DTMA 209	6.75	15.28	70	1	134	63	44.2	37.53	7.44
DTMA 237	6.72	15.18	73	2	141	67	40.33	37.87	6.82
DTMA 287	6.31	15.46	71	1	137	65.33	36.8	30.5	7.02
DTMA 60	5.86	15.4	73	3	139	63.33	47.03	34.43	8.08
DTMA 238	5.57	15.26	73	4	143	65.67	36.27	31.73	9.54
DTMA 235	5.55	15.14	71	2	139	65.67	37.67	39.97	8.99
DTMA 207	5.35	15.17	73	4	139	61.67	41.2	52.8	6.62
LPSC7F64	5.14	15.39	82	4	145	58	38.63	36	10.97
DTMA 184	4.92	15.22	69	2	137	66	45.83	36.07	8.96
DTMA 145	4.88	14.64	77	4	148	68	32.37	33.57	9.33
DTMA 44	4.65	14.98	73	2	140	65	41.53	31.77	6.01
CML247/CML254	4.44	15.03	75	3	144	66	29.13	37.6	7.76
DTMA 155	4.01	15.6	78	3	141	60.67	36.4	32.73	8.74
DTMA 179	3.42	14.75	77	6	147	63.67	33.97	26.3	8.27
DTMA 125	3.24	14.65	73	3	134	58.66	29.13	32.17	7.82
MG	5.27	15.16	74	3	141	64.10	37.90	35.63	8.12
LSD	1.63	0.70	2.11	1.71	6.23	6.44	13.83	11.92	2.11
GENOTIPO	PV2_9	SPAD1	SPAD2	SPAD3	SPAD4	LR1	LR2	LR3	SEN
DTMA 85	32.47	44.6	31.7	24.3	9.7	2	2	3	57.09
DTMA 209	26.73	43.2	32.5	15.3	10.8	3	3	4	78.93
DTMA 237	28.87	45	34.6	31	12.5	3	3	4	71.23
DTMA 287	23.1	43.3	25.6	14.1	6.2	3	3	4	95.36
DTMA 60	31.17	42.6	28.6	22.2	12.7	3	3	3	89.68
DTMA 238	25.83	42.9	26.2	17.2	7.7	2	3	3	72.84
DTMA 235	32.1	42.1	26	19.4	8.2	3	3	4	73.85
DTMA 207	27.6	45.8	35.6	24.7	11	3	4	3	80.67
LPSC7F64	33.2	39.2	28.2	23.6	15.5	2	3	3	57.75
DTMA 184	29.23	42.7	30.2	15.7	9.7	3	3	3	80.06
DTMA 145	21.87	43.2	35.6	22.6	12.6	4	4	3	77.44
DTMA 44	25.67	40.6	23.8	18.6	10.1	3	3	2	91.3
CML247/CML254	24.83	39.8	27.5	14.8	7.2	4	4	3	82.23
DTMA 155	27.47	41.6	32.2	22	7.5	2	3	3	81.83
DTMA 179	25.2	41.9	34.1	21.6	13.3	3	4	3	71.48
DTMA 125	23.37	37.3	33.2	10.7	6.5	4	4	4	111.5
MG	27.42	42.24	30.35	19.86	10.08	3	3	3	79.58
LSD	9.14	4.94	6.90	7.80	6.04	0.77	0.83	1.11	20.20

MG=media general, LSD=diferencia mínima significativa, REND=rendimiento, NDVI=índice de vegetación diferencial normalizada, ANTH=días a floración masculina, ASI=intervalo polen-estigma, MF=madurez fisiológica, GF=llenado de grano, PV1\_9=viabilidad de polen en el día uno a las nueve de la mañana, PV1\_13=viabilidad de polen en el día uno a la una de la tarde, PV2\_9=viabilidad de polen en el día dos a las nueve de la mañana, PV2\_13=viabilidad de polen en el día dos a la una de la tarde, SPAD1=contenido de clorofila 15 días después de floración, SPAD2=contenido de clorofila 30 días después de floración, SPAD3=contenido de clorofila 45 días después de floración, SPAD4=contenido de clorofila 60 días después de floración, LR1= enrollamiento foliar una semana después de floración, LR2=enrollamiento foliar dos semanas después de floración, LR3=enrollamiento foliar tres semanas después de floración, SEN= senescencia foliar.

Cuadro 4.4. Valores medios de 17 variables evaluadas en 16 híbridos para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014.

GENOTIPO	REND	NDVI	ANTH	ASI	MF	GF	PV1_13	PV1_9	PV2_13
DTMA 287	3.94	14.909	71	0	126	54.67	17.59	22.87	4.23
DTMA 209	3.42	14.479	71	1	127	59.52	19.21	19.03	3.73
DTMA 237	3.39	14.748	74	8.00E-09	127	55	14.87	17.10	3.80
DTMA 207	2.81	14.963	71	2	127	56.87	18.87	21.03	3.80
DTMA 85	2.64	14.85	76	1	128	51.51	14.76	15.60	3.63
DTMA 238	2.57	13.662	76	2	132	52.43	14.47	15.80	3.57
DTMA 44	2.19	14.448	73	3	128	43.95	17.21	21.53	3.73
DTMA 155	2.16	14.869	78	4	132	51.73	16.21	15.70	3.67
CML247/CML254	2.15	14.767	75	4	131	51.42	13.88	15.70	3.60
DTMA 184	2.11	15.298	69	2	124	55.96	24.70	25.53	4.53
DTMA 235	2.06	14.807	72	3	127	55.2	21.46	22.43	3.83
DTMA 60	2.05	14.786	74	3	129	45.23	17.08	21.20	3.53
DTMA 145	1.78	14.666	77	3	124	93.93	15.86	18.43	3.53
DTMA 125	1.51	14.594	71	5	127	56.72	17.20	19.67	3.67
LPSC7F64	1.32	14.825	82	NA	133	132.1	16.81	13.87	3.77
DTMA 179	0.93	14.394	78	4.5	135	77.05	15.76	16.13	3.60
MG	2.31	14.69	74	3	129	62.08	17.25	18.85	3.76
LSD	0.90	0.75	1.15	1.35	7.75	23.63	3.41	4.21	0.65
GENOTIPO	PV2_9	SPAD1	SPAD2	SPAD3	LR1	LR2	LR3	SEN	
DTMA 287	15.01	40.1	24.9	5.1	3	3	4	103.3	
DTMA 209	16.16	37.5	24.3	8.8	3	3	3	95.47	
DTMA 237	14.46	40.5	31.1	18	3	2	3	82.17	
DTMA 207	17.26	43.8	23.8	14.1	4	4	4	98.36	
DTMA 85	14.40	37	22.7	9.3	3	3	3	81.48	
DTMA 238	14.22	42	26.5	19.7	3	2	3	87.43	
DTMA 44	14.50	37.9	26.3	11.1	3	3	3	108.6	
DTMA 155	14.40	38.3	29.9	13.5	3	3	4	94.68	
CML247/CML254	14.79	40	27.1	9.8	4	4	4	88.46	
DTMA 184	19.57	39.6	15.8	8.9	3	3	3	106.8	
DTMA 235	15.57	34.3	20.1	6.5	3	3	4	105.5	
DTMA 60	15.64	41.4	29.7	9.6	3	3	3	100.7	
DTMA 145	15.17	40	28.1	13.4	4	3	4	87.13	
DTMA 125	16.89	32.3	18.5	6	4	4	5	121.5	
LPSC7F64	14.52	36.4	30	19.7	3	2	3	65.7	
DTMA 179	14.24	40.4	34.7	19.9	3	3	3	82.32	
MG	15.43	38.84	25.84	12.09	3	3	4	94.35	
LSD	2.57	4.74	9.83	8.14	0.64	0.99	0.64	13.92	

MG=media general, LSD=diferencia mínima significativa, REND=rendimiento, NDVI=índice de vegetación diferencial normalizada, ANTH=días a floración masculina, ASI=intervalo polen-estigma, MF=madurez fisiológica, GF=llenado de grano, PV1\_9=viabilidad de polen en el día uno a las nueve de la mañana, PV1\_13=viabilidad de polen en el día uno a la una de la tarde, PV2\_9=viabilidad de polen en el día dos a las nueve de la mañana, PV2\_13=viabilidad de polen en el día dos a la una de la tarde, SPAD1=contenido de clorofila 15 días después de floración, SPAD2=contenido de clorofila 30 días después de floración, SPAD3=contenido de clorofila 45 días después de floración, LR1=enrollamiento foliar una semana después de floración, LR2=enrollamiento foliar dos semanas después de floración, LR3=enrollamiento foliar tres semanas después de floración, SEN= senescencia foliar.

### 4.3. Heredabilidad

Para calcular la fracción de la varianza fenotípica debida a las diferencias entre los genotipos se estimó la heredabilidad ( $H^2$ ) para cada una de las variables medidas en esta investigación, así como en los tres tratamientos en estudio. En el cuadro 4.5 se muestran los resultados de esta estimación.

En el caso del tratamiento de riego normal en las variables REND, NDVI, ANTH, ASI, MF, GF, PV1\_13, PV1\_9, PV2\_13, SPAD1, SPAD2 Y SPAD3, se observan valores que oscilan entre .50 y 1 dando como resultado una alta heredabilidad. Una heredabilidad media con valor de .25 a .50 se presentó en la variable SPAD4. Y únicamente se presentó una variable con valor entre 0 y .25 con un heredabilidad baja y esta fue PV2\_9.

Para el tratamiento de riego intermedio, se observa una alta heredabilidad en las variables REND, SEN, ANTH, ASI, MF, PV1\_9, PV2\_13, SPAD2, SPAD3, LR1 Y LR2, así como una heredabilidad media en las variables NDVI, GF, SPAD1, SPAD4 Y LR3, mientras que se detectó una heredabilidad baja en las variables PV1\_13 y PV2\_9.

En el tratamiento de riego reducido las variables con heredabilidad alta fueron REND, SEN, ANTH, ASI, GF, PV1\_13, PV1\_9, PV2\_9, SPAD1, SPAD3, LR1, LR2 y LR3. Y una heredabilidad media en las variables NDVI, MF, PV2\_13 y SPAD2.

Todos los resultados anteriores sugieren que la mayor heredabilidad se consigue en los tratamientos de riego normal y riego reducido, por lo que el tratamiento de riego intermedio no resulta eficiente en este aspecto, por lo cual

podiera ser eliminado en futuras evaluaciones y considerar únicamente el tratamiento tres por ser el que puede contribuir a un mayor avance en el mejoramiento genético para tolerancia a sequía.

Por otro lado Edmeades *et al.*, en 1998 establecieron que la característica secundaria ideal debe ser altamente heredable, y su medición debe ser rápida y poco costosa, entre otras cosas, mismas que en la presente investigación la viabilidad de polen no presento por lo que pudiera ser considerado descartarla en futuras evaluaciones.

Cuadro 4.5. Heredabilidad de 18 variables evaluadas en 16 híbridos de maíz establecidos en tres niveles de riego. CIMMYT 2014

TRATAMIENTO	REND	NDVI	SEN	ANTH	ASI	MF	GF	PV1-13	PV1-9
R. NORMAL	0.85	0.68		0.97	0.82	0.66	0.60	0.80	0.65
R. INTERMEDIO	0.78	0.31	0.74	0.96	0.84	0.72	0.49	0.25	0.53
R. REDUCIDO	0.86	0.47	0.87	0.99	0.92	0.29	0.87	0.83	0.82
TRATAMIENTO	PV2-13	PV2-9	SPAD1	SPAD2	SPAD3	SPAD4	LR1	LR2	LR3
R. NORMAL	0.81	0.20	0.79	0.84	0.57	0.37			
R. INTERMEDIO	0.63	0.24	0.44	0.58	0.74	0.38	0.78	0.68	0.36
R. REDUCIDO	0.28	0.63	0.70	0.47	0.69		0.63	0.72	0.86

#### 4.4. Correlaciones entre variables fisiológicas y rendimiento de grano

Para conocer la relación existente entre el rendimiento de grano y las variables fisiológicas evaluadas (NDVI, SPAD, enrollamiento, senescencia, intervalo polen estigma (ASI), viabilidad de polen, madurez fisiológica) en las diferentes condiciones de sequía, se realizaron las correlaciones de ambos parámetros, las cuales se presentan a continuación.

#### 4.4.1. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego normal

La figura 4.1 muestra la relación entre el rendimiento de grano y el AUCNDVI, que es el área que está debajo de la curva para cuatro mediciones de NDVI, se presentan los datos de los 16 híbridos evaluados en condiciones de riego normal en el ciclo primavera de 2014.

De acuerdo a la dispersión que presentan los datos se observa que existe una correlación positiva y significativa entre estas dos variables, se logra apreciar que los niveles de reflectancia afectan en gran medida el rendimiento, pues se observa que el rendimiento tiende a aumentar conforme lo hace la reflectancia.

Lo anterior difiere a lo encontrado por Guzmán (2013) quien evaluando estas dos variables no encontró correlación existente en ninguna de las etapas fisiológicas de la planta en condiciones de riego normal (22DDG  $R^2=-0.04$ , 44DDG  $R^2=-0.10$ , 88DDG  $R^2=-0.05$ , 110DDG  $R^2=-0.11$ ), posiblemente porque el material que utilizo estaba compuesto por genotipos provenientes de distintos orígenes y los empleados en este trabajo son híbridos evaluados y seleccionados previamente, pero concuerda con Teal *et al* (2006) quienes muestran que existe una fuerte correlación entre NDVI y rendimiento en el estadio  $V_8$  de crecimiento de maíz ( $R^2=0.77$ ).

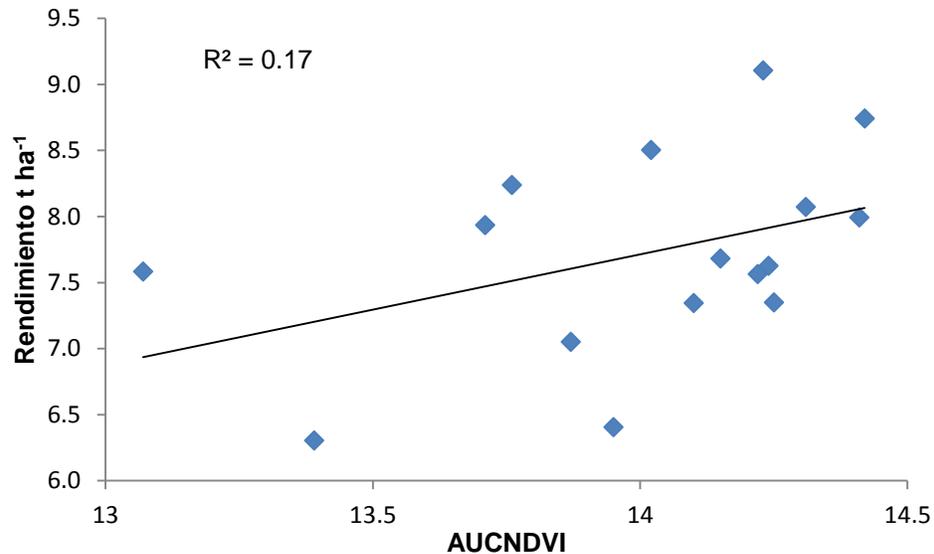


Figura 4.1. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI para el tratamiento de riego normal en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014.

#### 4.4.2. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego intermedio

El NDVI ha sido correlacionado con numerosas variables como: la deficiencia de nutrientes en los cultivos, el rendimiento de cereales de grano pequeño y el estrés hídrico prolongado de las plantas. En la figura 4.2 se observa la relación entre el rendimiento y el AUCNDVI de los híbridos en este tratamiento, el valor de la correlación aumento respecto a la del tratamiento de riego normal.

Se observa que el AUCNDVI afecta notablemente el rendimiento pues los híbridos que presentan mayor valor de este son también los de mejor rendimiento.

Así mismo se observa que el valor de AUCNDVI aumenta en comparación lo observado en el tratamiento de riego normal.

Las plantas bien irrigadas poseen menores temperaturas foliares que las plantas que sufren déficit hídrico. Los resultados obtenidos en este trabajo son contrastantes a los encontrados por Guzmán (2013) que encontró una correlación entre estas dos variables baja y con valor negativo (44DDG  $R^2=-0.24$ , 88DDG  $R^2=-0.24$ , 110 DDG  $R^2=-0.29$ ).

También se observa que los híbridos con mayor rendimiento en este tratamiento no son los mismos que para riego normal, lo que confirma que el mejoramiento para tolerancia a algún tipo de estrés no resulta eficiente al evaluar los materiales en óptimas condiciones, ya que los mejores híbridos resultantes en buenas condiciones no serán los mejores en condiciones de estrés. En este tratamiento sobresale puntualmente el híbrido “DTMA85”, y le siguen en producción los híbridos “DTMA 209” y “DTMA 237”.

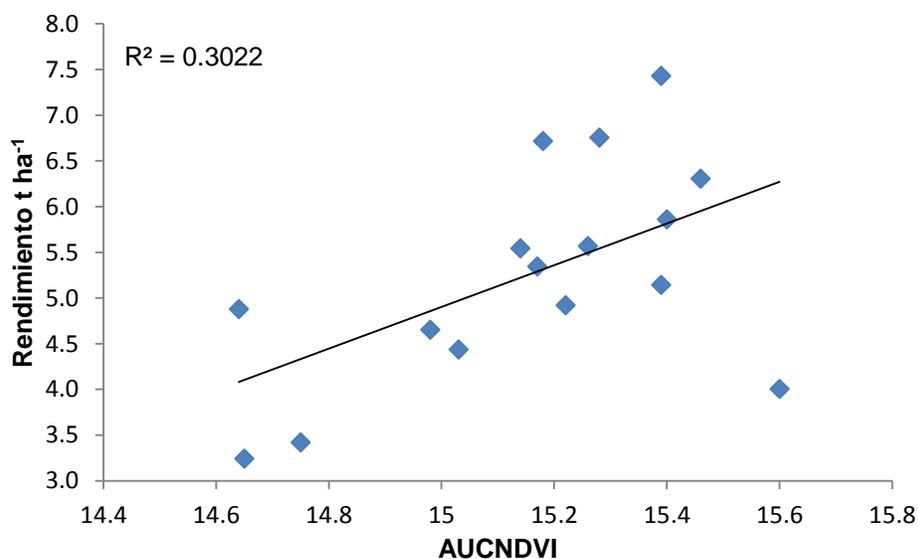


Figura 4.2. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI, para el tratamiento de riego intermedio en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014.

#### **4.4.3. Relación entre NDVI y rendimiento para la condición de riego reducido.**

El NDVI está basado en las propiedades de los tejidos vegetales verdes de reflejar la radiación solar incidente de manera diferencial en la banda espectral correspondiente al rojo del espectro visible y la correspondiente al infrarrojo cercano. La presencia de clorofila en el tejido vegetal provoca una alta reflexión en el infrarrojo cercano y una baja reflexión en el rojo.

En la figura 4.3 se presenta la correlación existente entre el rendimiento y el AUCNDVI de los diferentes híbridos para el tratamiento de riego reducido. Se observa que en las tomas el valor de NDVI así como la correlación disminuye respecto al encontrado en los tratamientos riego normal y riego intermedio. También se observa que en las tomas realizadas no existe prácticamente correlación entre estas dos variables, lo cual se puede deber a que en este tratamiento las hojas presentaron alto grado de enrollamiento por lo cual al realizar la toma no resultaba tener alta reflectancia. Estos resultados contrastan con los encontrados por Aparicio *et al.*, (2000) que observaron una correlación positiva entre el NDVI y el rendimiento de grano en todas las etapas de trigo en condiciones de secano.

Se encontraron híbridos con valores medios de AUCNDVI y altos rendimientos, así mismo híbridos con valores altos y bajos rendimientos. La diferencia entre rendimientos de los diferentes híbridos se debe posiblemente al potencial de cada uno de ellos. Para este tratamiento sobresalen los híbridos “DTMA 287”, “DTMA 237” y “DTMA 209” de los cuales el segundo y el tercero, coinciden con los encontrados en el tratamiento de riego intermedio y ninguno de ellos coincide con los encontrados en riego normal, por lo tanto se puede decir que estos dos híbridos presentan rasgos que indican tolerancia a sequía.

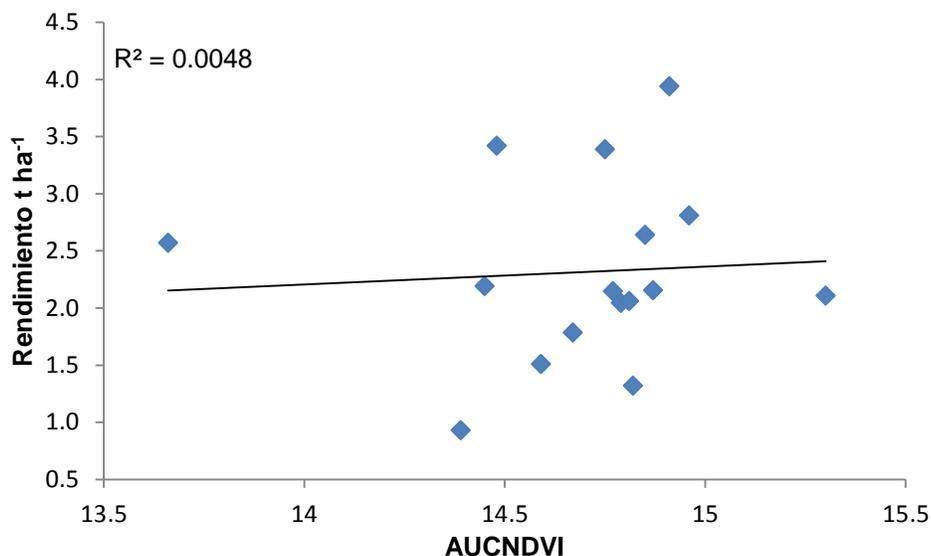


Figura 4.3. Relación del rendimiento en función del AUCNDVI, para el tratamiento de riego reducido en 16 híbridos de maíz. CIMMYT 2014.

#### 4.4.4. Relación entre el rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego normal

En los últimos años se ha obtenido una relación más directa entre el contenido en clorofila de las hojas y el rendimiento en grano, al comprobar que la tasa de fotosíntesis neta está estrechamente asociada con la pérdida de clorofila durante el periodo de llenado de grano de los cereales.

En la figura 4.4 se presenta la relación que existe entre el rendimiento y las unidades SPAD de los híbridos en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de la floración. Se observa que en las primeras tres tomas no existe correlación significativa entre las variables evaluadas y que solo en la última toma “D” se observa que la correlación aumenta ligeramente. Guzmán (2013), observó una baja correlación entre los valores de SPAD y el rendimiento de grano ( $R^2=0.20$ ,  $R^2=0.03$ ,  $R^2=0.02$ ) evaluando en la 2ª, 4ª y 6ª semana después de la floración y, atribuye estos

resultados, a las diferentes temperaturas medias que se presentaron durante el experimento. Lo anterior coincide con lo encontrado en el presente trabajo pues se encontró una ligera correlación en la primera toma pero disminuyó hasta prácticamente cero para las siguientes dos, debido a que en el trabajo de Guzmán (2013) solo se realizaron tres tomas no es posible comparar la última toma.

Los resultados que se presentan en este trabajo contrastan con los encontrados por Mendoza *et al.*, (2006) quienes observaron una correlación entre la clorofila y el rendimiento en los primeros estadios de crecimiento del maíz a los 45 y 75 dds ( $R^2=0.45$ ,  $R^2=0.38$ ).

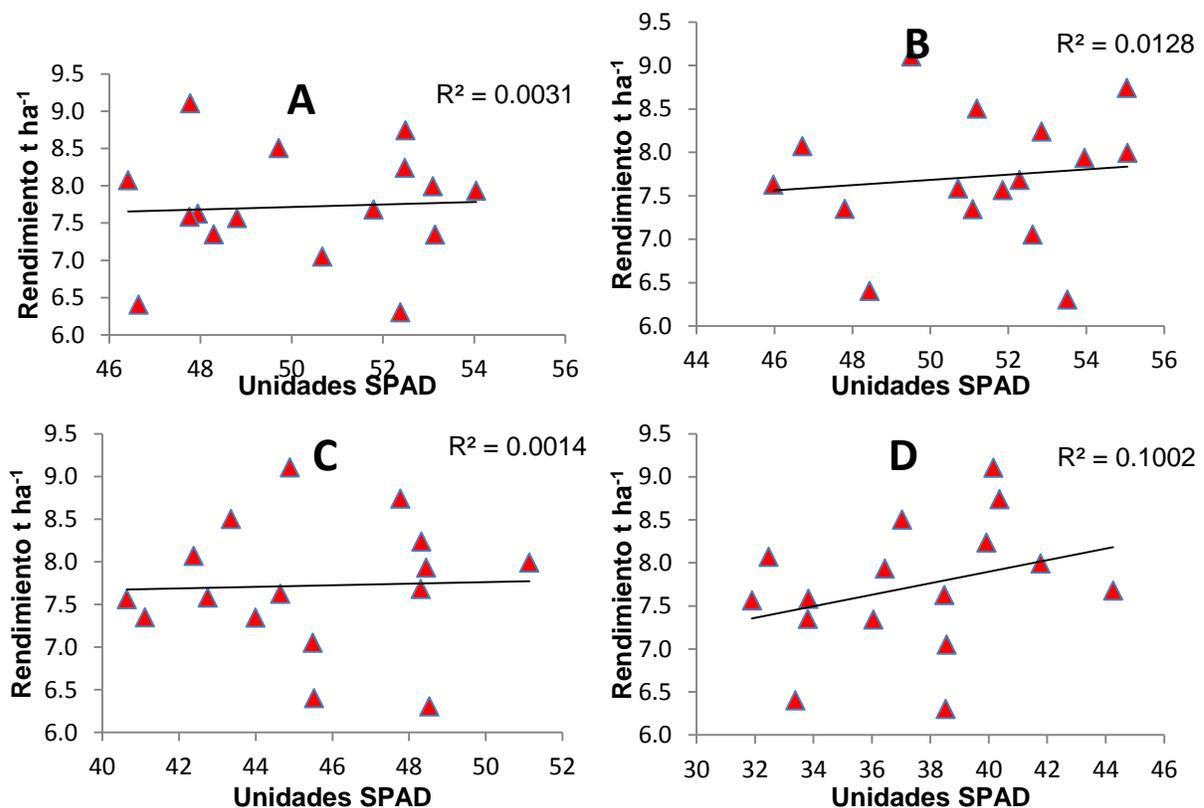


Figura 4.4. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego normal. CIMMYT 2014.

#### **4.4.5. Relación del rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego intermedio**

La medición de contenido relativo de la clorofila con el SPAD se ha propuesto en estudios de sequía como criterio para la selección de genotipos. En la Figura 4.5 se presenta la correlación entre el rendimiento y la cantidad de clorofila (unidades SPAD) en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de la floración.

Se observa que en las primeras dos tomas no existe prácticamente correlación entre estos dos parámetros, además de que el contenido de clorofila en esta etapa aparentemente no afecta el rendimiento puesto que se observan híbridos con valores bajos de clorofila y altos rendimientos como lo es el caso del híbrido “DTMA85”, así también materiales con alto contenido de clorofila y bajos rendimientos.

Estos resultados contrastan con los encontrados por Sainz y Echeverría (1998) quienes reportaron valores altos de correlación ( $R^2=0.90$ ) a los 15 días después de floración y comentan que el uso del SPAD a partir de este estadio es de gran utilidad ya que detecto con mucha precisión situaciones de deficiencia de  $N_2$ .

En las siguientes dos tomas se observa que la cantidad de clorofila disminuye y al ocurrir esto el valor de la correlación aumenta pero de una manera negativa, es decir que a medida que las plantas presentan mayor clorofila los rendimientos son menores, esto es provocado posiblemente por la incapacidad de las plantas de traslocar rápidamente los nutrientes hacia las partes importantes y al mantener vivas las hojas descuidan la nutrición de la mazorca. Resultados similares se han encontrado en otros trabajos con evaluaciones en sequía, por ejemplo Xian-He *et al.*, (1995) donde reportaron pérdidas de clorofila en trigo afectado por una deficiencia hídrica. Así mismo difieren del trabajo de Guzmán (2013) que reporto una

baja correlación en sus tres evaluaciones a la 2da, 4ta y 6ta semana después de floración ( $R^2=0.019$ ,  $R^2=0.09$ ,  $R^2=0.10$ ).

Se aprecia que a medida que avanza el ciclo del cultivo el contenido de clorofila presenta mayor asociación con el rendimiento, pero esta es de manera negativa, puesto que el déficit hídrico provoca que las plantas tengan menor cantidad de nutrientes disponibles y el no ser utilizados eficientemente puede llevar a resultados catastróficos.

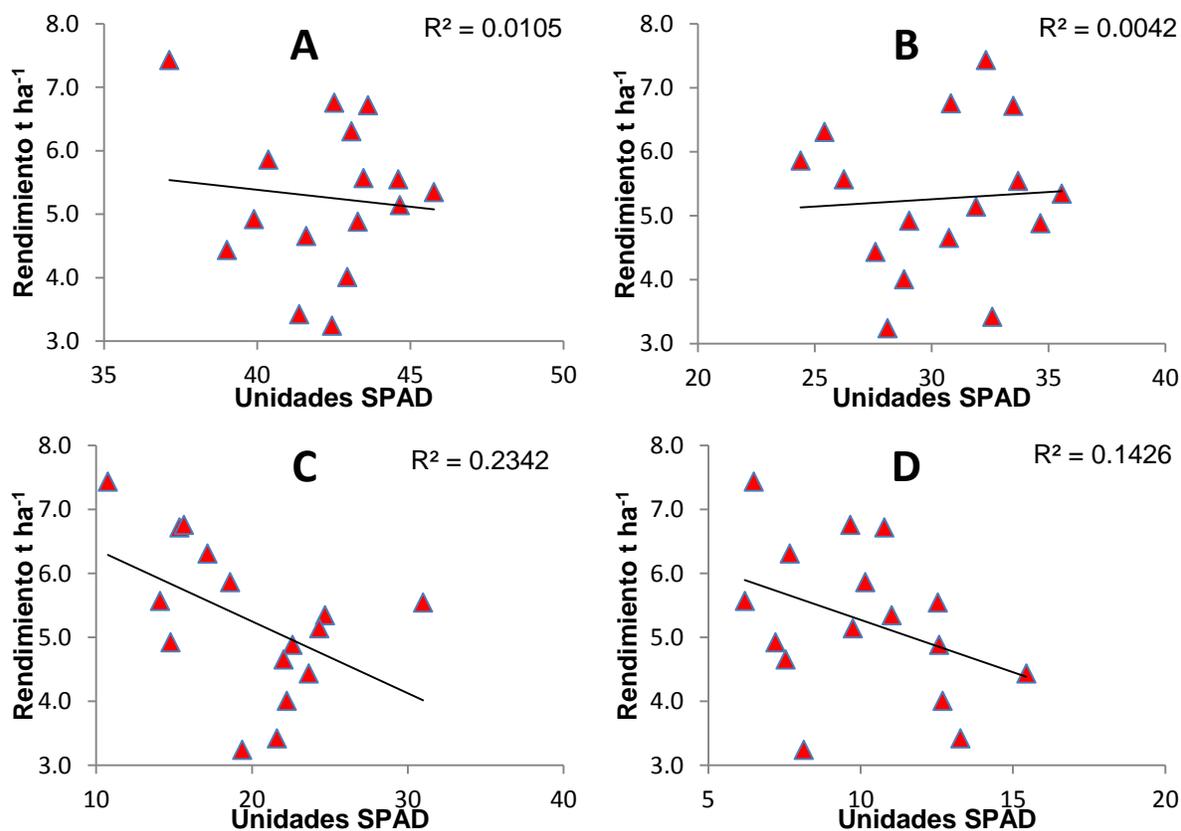


Figura 4.5. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B), 6(C) y 8(D) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.

#### **4.4.6. Relación del rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) para el tratamiento de riego reducido**

El contenido de clorofila juega un papel importante en las plantas cultivadas ya que esta positivamente correlacionado con la fotosíntesis, por tanto, la reducción en el contenido de clorofila puede ser considerada como una respuesta de las plantas al estrés.

En la figura 4.6 se muestra la correlación observada entre el rendimiento y el contenido de clorofila (SPAD) a la semana 2(A), 4(B) y 6(C) después de la floración, donde se aprecia que no existe correlación significativa entre estas dos variables. También se observa que la cantidad de clorofila o unidades SPAD tiene una reducción con respecto al encontrado en los otros dos tratamientos, esto debido principalmente a la intensidad del estrés, ya que las plantas al estar sometidas al déficit hídrico aceleran la senescencia y traslocan los nutrientes rápidamente hacia la mazorca, resultando esto en hojas más secas y por ende menor contenido de clorofila.

Estos resultados coinciden con los encontrados por Fotovat *et al.*, (2007) que encontraron que el contenido de clorofila foliar disminuía significativamente bajo un estrés hídrico severo respecto a aquellos con una mayor disponibilidad hídrica en siete cultivares de trigo.

Se aprecia que el contenido de clorofila en este tratamiento no interfiere considerablemente en el rendimiento pues se encontraron híbridos con valores máximos de SPAD y el menor rendimiento. A su vez se encontraron híbridos con valores mínimos de SPAD y los mejores rendimientos.

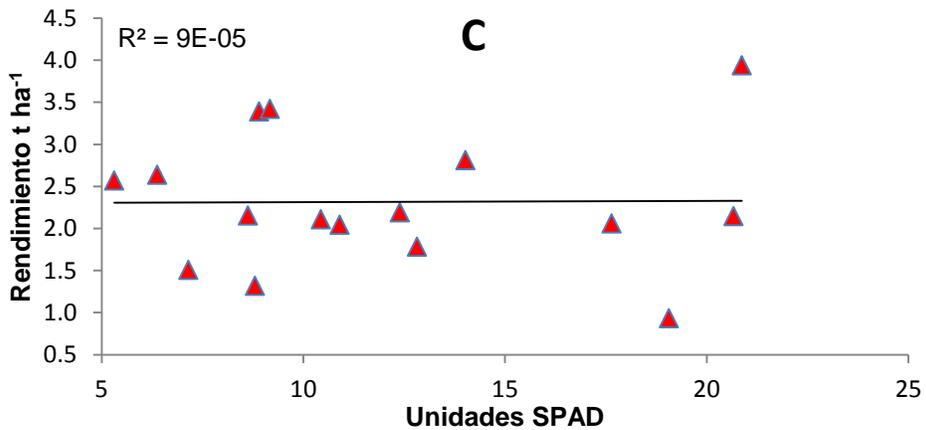
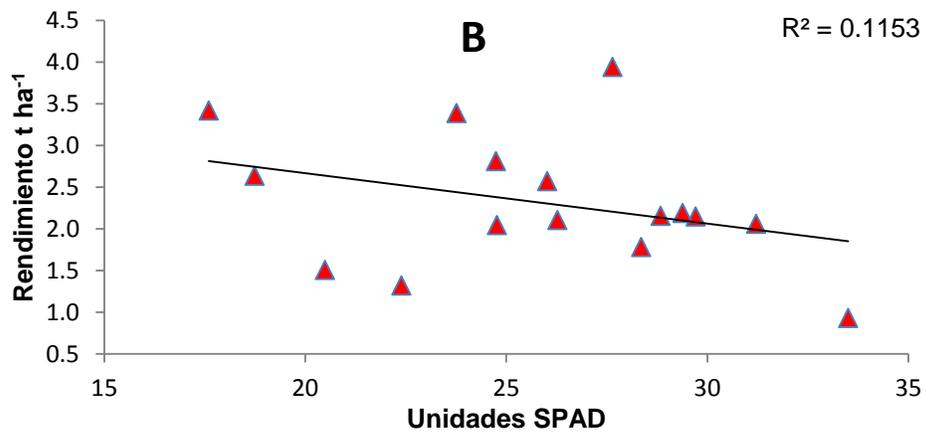
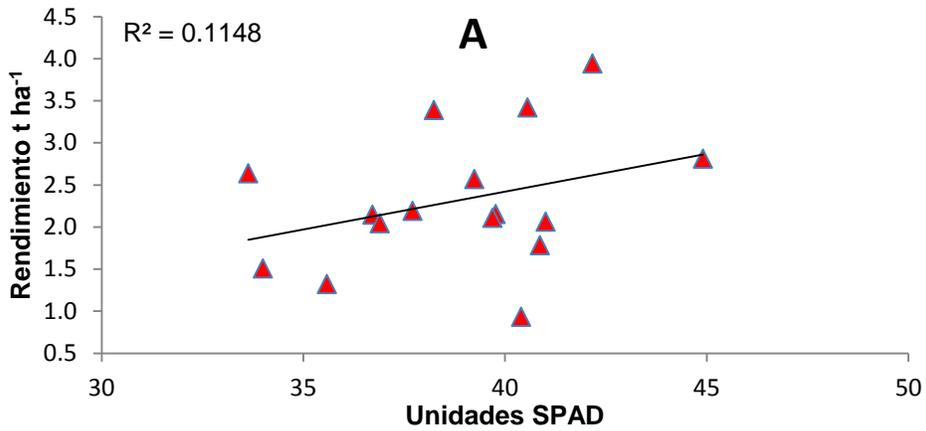


Figura 4.6. Relación entre el rendimiento y contenido de clorofila (SPAD), evaluados en la semana 2(A), 4(B) y 6(C) después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014.

#### **4.4.7. Relación entre el rendimiento y el enrollamiento foliar para el tratamiento de riego intermedio**

El enrollamiento foliar es uno de los mecanismos de reducción de la radiación interceptada como respuesta al estrés hídrico. En la figura 4.7 se presenta la correlación entre rendimiento y enrollamiento foliar evaluado a la semana 1 (A,B), 2(C,D) y 3(E,F) después de la floración para el tratamiento de riego intermedio. Se puede observar que en las tres semanas de evaluación, si bien existe algo de correlación esta no resulta ser significativa, esto puede ser causado por que el nivel de estrés al que fue sometido el material en este tratamiento no fue tan grave como para verse reflejado en el rendimiento.

Ceniceros en el 2013 encontró que existe correlación en estas dos variables y que esta resulta ser positiva, así también encontró genotipos con valores bajos de enrollamiento y rendimientos promedio, también genotipos con alto valor de enrollamiento y de bajos rendimientos lo anterior contrasta con lo presentado en este trabajo pues además de que no se observa correlación, se puede destacar que el enrollamiento no influye en el rendimiento pues se observan híbridos con niveles similares de enrollamiento y muy diferentes en cuanto a rendimiento.

A pesar de que en teoría las plantas con altos niveles de enrollamiento son las de menores rendimientos a causa de la poca luz captada y menor cantidad de fotosíntesis realizada en esta investigación se destaca al híbrido "DTMA 85" por ser el de mayor rendimiento a pesar de ser también el que presenta los niveles de enrollamiento más elevados en la mayoría de las evaluaciones.

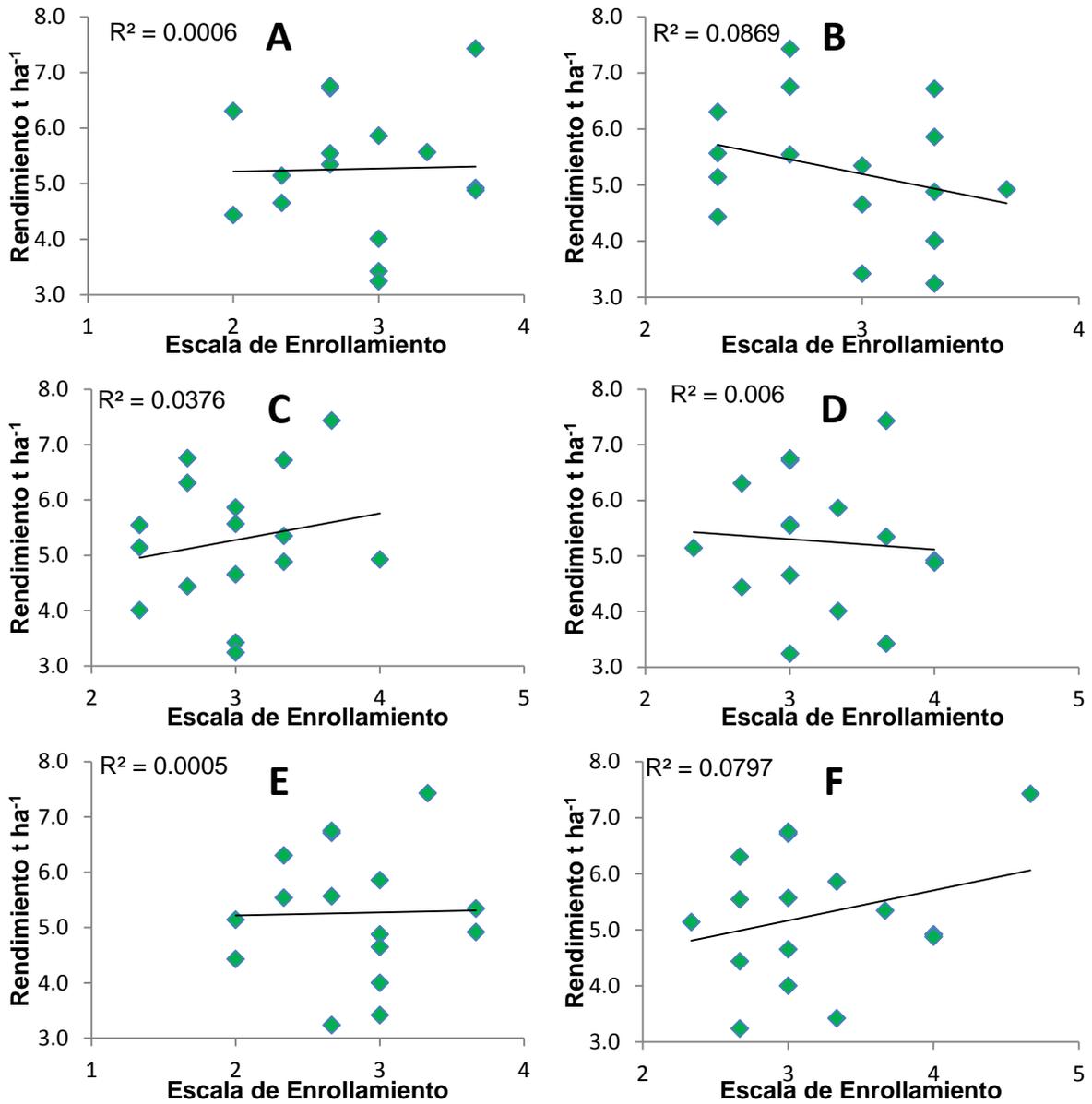


Figura 4.7. Relación entre el rendimiento de grano y el enrollamiento foliar evaluado a la semana 1(A, B), 2(C, D) y 3(E, F) después de la floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.

#### **4.4.8. Relación entre el rendimiento y el enrollamiento foliar para el tratamiento de riego reducido**

Algunas plantas cultivadas muestran cierta capacidad de adaptación a la sequía, por ejemplo, orientando las hojas para que no presenten la cara al sol como el frijol o enrollándolas como el maíz. En la figura 4.8 se establece la correlación que existe entre el rendimiento de grano y el enrollamiento foliar evaluado en la semana 1(A, B), 2(C, D) y 3(E, F) después de la floración para el tratamiento de riego reducido.

Aquí podemos observar que en las seis tomas se presenta una correlación muy baja llegando en alguna de ellas prácticamente a cero. Se observan híbridos con valores medios de enrollamiento y rendimientos muy bajos, pero también se observan híbridos con altos rendimientos y los mismos valores de enrollamiento que los primeros. Estos resultados son similares a los reportados por Guzmán (2013) que evaluó diferentes genotipos en sequía y muestra valores de correlación baja y no significativa en los muestreos realizados entre estos dos parámetros en las mismas etapas de evaluación que en el presente trabajo.

Al enrollarse las hojas demuestran un estrés hídrico bastante fuerte y aquellas que no se enrollan pueden ser visualizadas como en buen estado hídrico. Sin embargo, el enrollamiento protege a la hoja contra un mayor estrés, ya que reduce la incidencia solar, mantiene las temperaturas más bajas y protege la hoja contra la foto-oxidación. En el presente trabajo se observó este fenómeno ya que a pesar de que los híbridos con mayor rendimiento son los de valores menores de enrollamiento, también se observan híbridos con valores altos de enrollamiento y rendimientos por encima de la media.

Para este tratamiento a pesar de no ser el que presenta siempre los menores valores de enrollamiento sobresale el híbrido “DTMA 287” al ser uno de los que

presenta los menores valores, demostrando con esto que puede ser considerado como un híbrido con características de tolerancia a sequía.

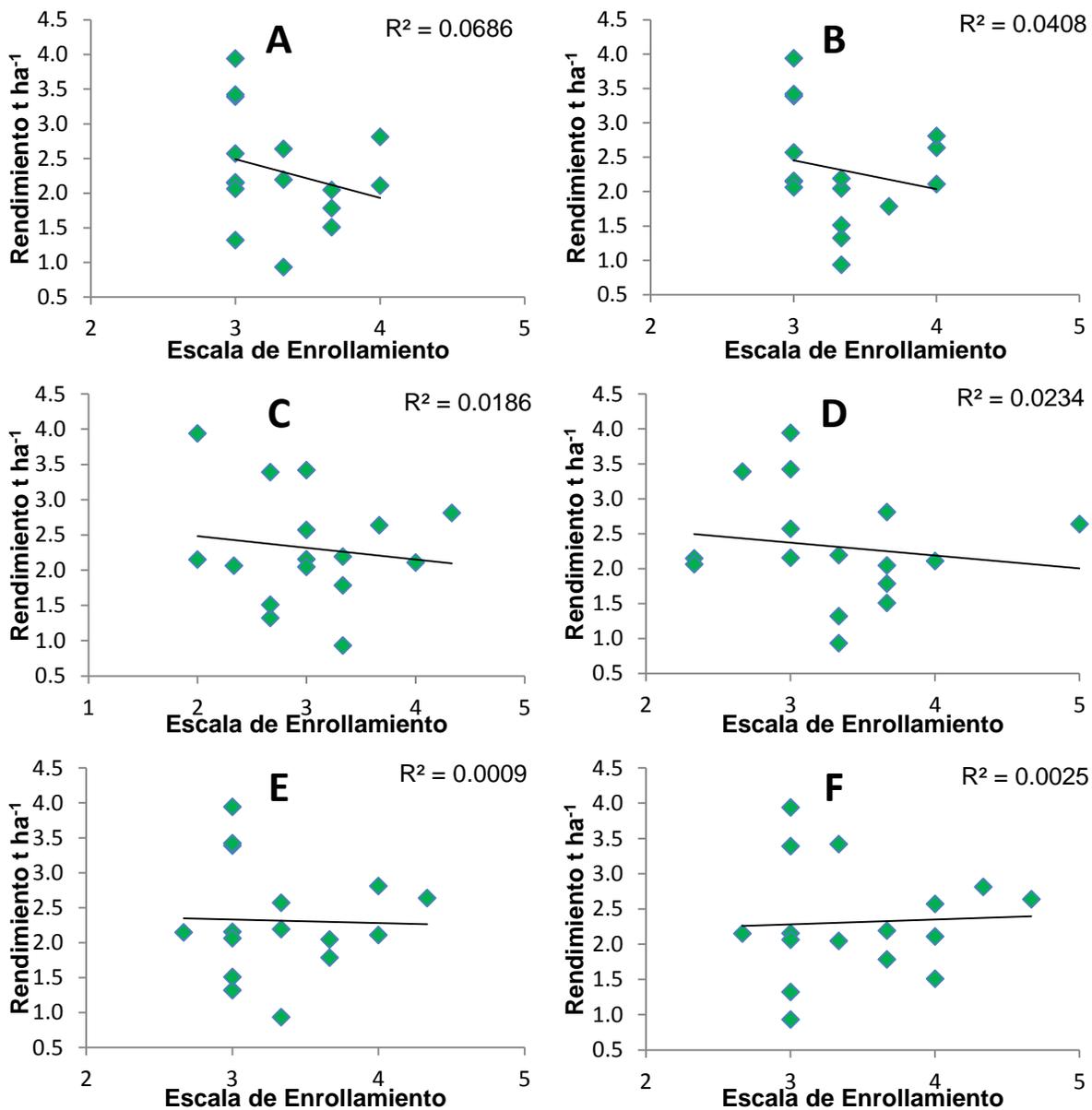


Figura 4.8. Relación entre el rendimiento de grano y el enrollamiento foliar evaluado a la semana 1(A, B), 2(C, D) y 3(E, F) después de la floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014.

#### **4.4.9. Relación entre el rendimiento y la senescencia foliar para el tratamiento de riego intermedio**

Las plantas son implacables recicladoras de recursos y lo hacen empleando la senescencia y la muerte para la reasignación de estos. En la figura 4.9 es presentada la relación encontrada entre el rendimiento de grano y el área que está debajo de la curva para tres mediciones de senescencia, aquí podemos observar que para estos dos parámetros existe correlación significativa entre ellos, y que además esta resulta ser negativa.

La senescencia como síntoma es también causada cuando las partes verdes de las plantas son removidas y almacenadas originando el amarillamiento pos cosecha y la pérdida de nutrientes en los vegetales dando como resultado pérdidas económicas importantes. Es por esta causa que los valores de correlación encontrados en este trabajo resultan ser negativos ya que al aumentar la senescencia foliar se disminuyen las partes verdes de las hojas y con ello la tasa de fotosíntesis, y al ocurrir esto las plantas generan una menor cantidad de materia asimilada necesaria para un buen desarrollo de la mazorca, lo que da como resultado la caída en rendimiento de los híbridos.

Los anteriores resultados contrastan con los reportados por Guzmán (2013) quien observó una baja correlación ( $R^2=-0.08$ ,  $R^2=-0.05$ ,  $R^2=-0.06$ ) entre estos dos parámetros en los tres muestreos en las mismas etapas de desarrollo y asume que la senescencia estuvo mayormente influenciada quizá por la precocidad.

Por otro lado se destaca en este tratamiento al híbrido “DTMA 85” ya que en las evaluaciones presenta los menores valores de senescencia y de igual manera en rendimiento, lo que muestra que la senescencia influye en gran medida en el rendimiento.

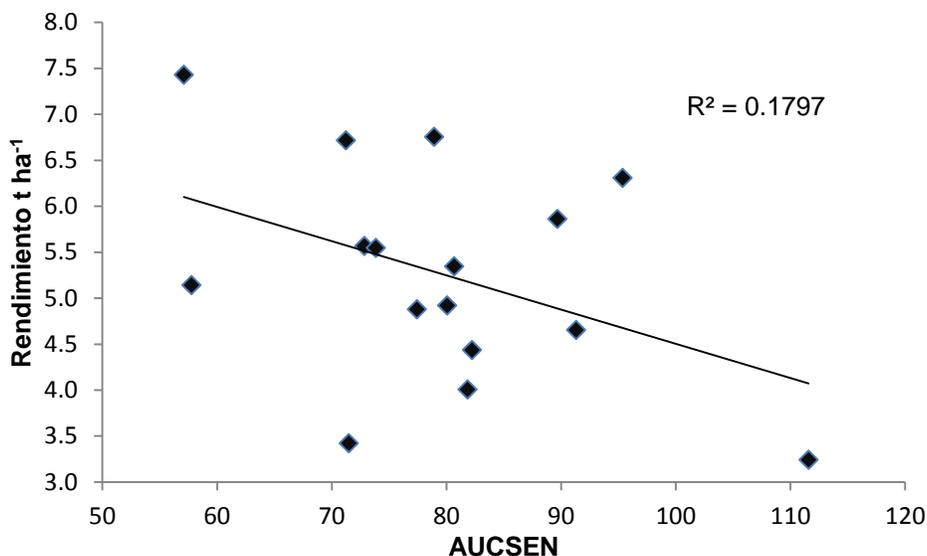


Figura 4.9. Relación entre el rendimiento y el AUCSEN evaluada después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego intermedio. CIMMYT 2014.

#### 4.4.10. Relación entre el rendimiento y la senescencia foliar para el tratamiento de riego reducido

La senescencia foliar es un proceso desencadenado tanto por factores ambientales como genéticos, particularmente a través de la producción de fitohormonas como las citocininas, etileno y ácido abscísico (ABA), que la aceleran o retrasan. En la figura 4.10 es presentada la relación observada entre el rendimiento y la senescencia foliar, se puede detectar que el valor de la senescencia aumenta con respecto al encontrado en el tratamiento de riego intermedio y esto debido a que la mayor intensidad del estrés hídrico acelero este mecanismo.

También se observa que no existe una correlación entre estos dos parámetros, puesto que se encontraron híbridos con valores altos de senescencia y rendimientos igualmente altos, pero también híbridos con los rendimientos más bajos y valores de senescencia iguales a los de los primeros.

De igual manera se encontraron híbridos con gran capacidad para retrasar la senescencia pero esta no se refleja en los rendimientos pues estos son muy bajos, en esta situación se encuentra puntualmente el híbrido “DTMA179”.

Resultados similares son presentados por Guzmán (2013) quien observo que no existe relación del rendimiento con senescencia en la 2da y 4ta semana, en tanto que observo una baja correlación ( $R^2=0.28$ ) en la 6ta semana.

La diferencia entre rendimientos de los diferentes híbridos puede deberse al afecto del estrés hídrico y a otros mecanismos inducidos por este en las plantas y no propiamente a la senescencia foliar.

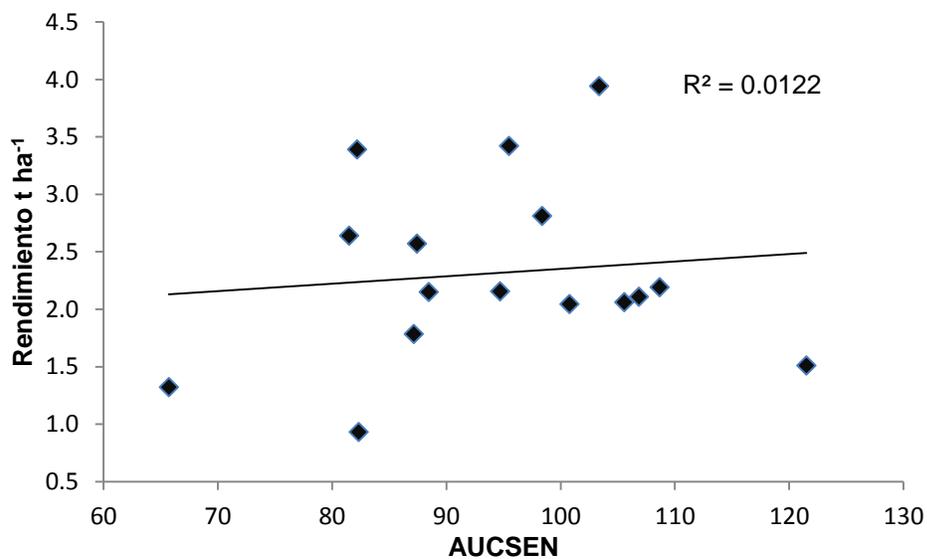


Figura 4.10. Relación entre el rendimiento y el AUCSEN después de floración en 16 híbridos de maíz para el tratamiento de riego reducido. CIMMYT 2014.

#### 4.4.11. Relación entre el rendimiento y el intervalo polen-estigma (ASI)

El estrés de la floración ocurre cuando hay un periodo seco entre el inicio de la antesis y la aparición de los estambres, lo cual puede llevar a la esterilidad o a una severa reducción en el número de granos por mazorca. En la figura 4.11 es

presentada la relación que existe entre el rendimiento y el ASI evaluada en los tratamientos de riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C).

En esta figura podemos observar que para el tratamiento A no existe una correlación significativa entre las variables, pues encontramos híbridos con rendimientos de los más altos y un ASI similar a híbridos que presentan los rendimientos más bajos. Además se aprecia que los diferentes híbridos en este tratamiento no presentan valores altos de ASI debido principalmente a que se encontraban con todos los recursos necesarios para su desarrollo y el incremento en el valor de esta variable en algunos casos fue causada por características genéticas propias del híbrido.

Fisher *et al.* (1989) Dicen que la elongación de los estambres es muy sensible al contenido de agua de la planta y al abastecimiento de materia asimilada y el estrés antes de la floración puede aumentar el intervalo entre la antesis y la aparición de los estambres (ASI), lo anterior coincide con lo encontrado en este trabajo pues se observa que en los tratamientos B y C los valores de ASI aumentan respecto a los encontrados en el tratamiento A.

Así mismo se aprecia para estos tratamientos (B y C) una correlación significativa y negativa puesto que se observa que los híbridos con valores menores de ASI presentan los más altos rendimientos, de igual manera híbridos con mayores valores de ASI son los de menores rendimientos. Esto concuerda con lo publicado por Westgate *et al.* (2004) que dicen que si el ASI se incrementa, los estigmas emergen muy tarde para capturar el polen liberado, y los rendimientos caen dramáticamente, ya que estos estigmas largos, húmedos y pegajosos, dependen de un suministro suficiente de agua para brotar en el momento correcto.

Bolaños y Edmeades (1996) dicen que en ensayos en sequía lo ideal es que el ASI dure, en promedio, de cuatro a ocho días y que los rendimientos sean, en promedio, de una a dos t ha<sup>-1</sup>. Esto es observado en el presente trabajo pues a pesar

de que el tratamiento B rebasa los rendimientos recomendados el C si cumple con ellos, en cuanto al promedio de ASI los dos tratamientos con estrés cumplen con lo recomendado.

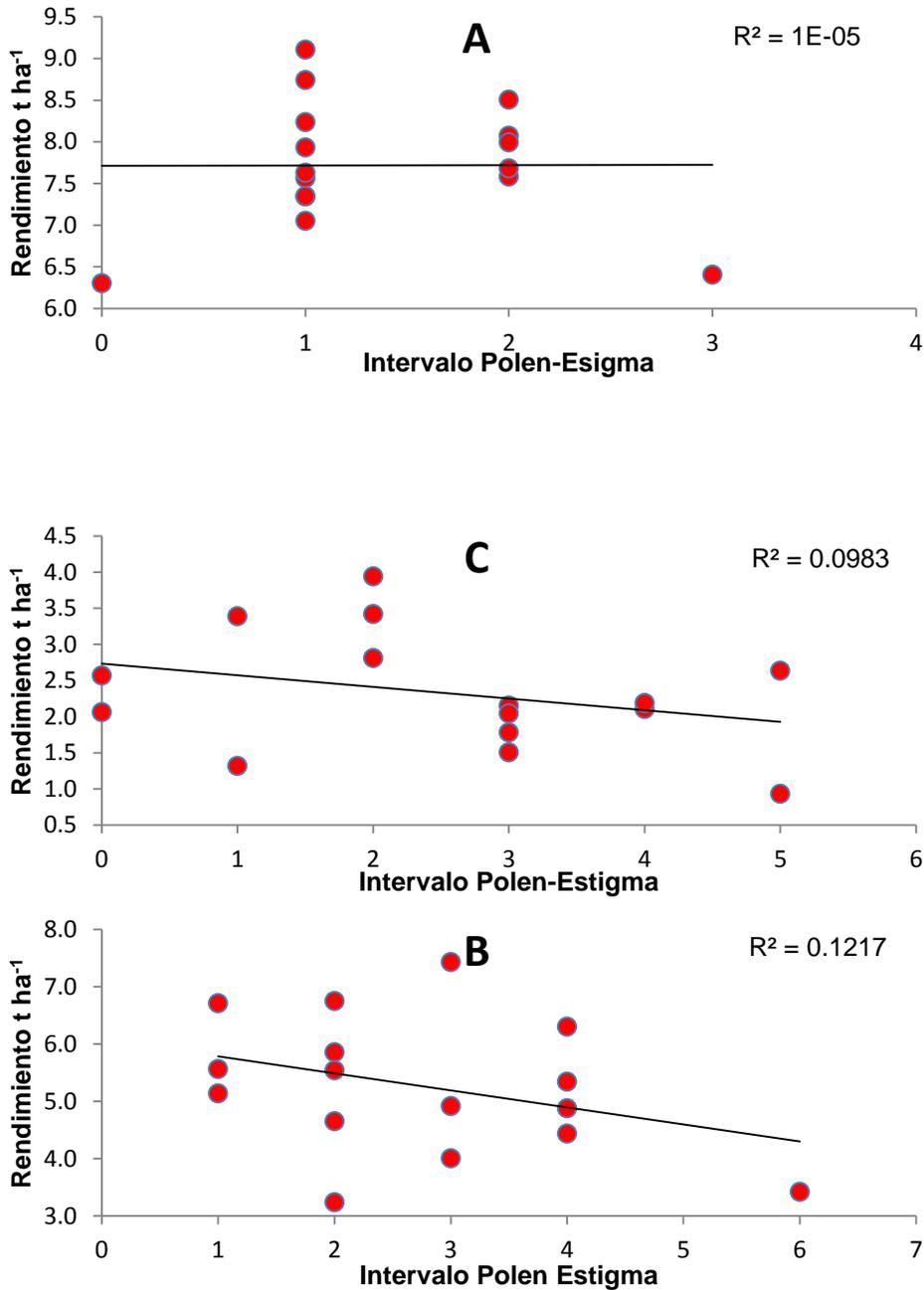


Figura 4.11. Relación entre el rendimiento y el intervalo polen-estigma (ASI) evaluada en 16 híbridos de maíz para los tratamientos riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido(C). CIMMYT 2014.

#### **4.4.12. Relación del rendimiento con la viabilidad de polen en maíz**

La determinación de la viabilidad del polen y su importancia en estudios de la biología de la reproducción y mejoramiento genético de plantas es fundamental para definir la dirección de una cruce. En la figura 4.12 es presentada la relación existente entre el rendimiento y la viabilidad de polen captada en dos diferentes horas (9:00 y 13:00) del día para los tratamientos de riego normal (A1 y A2), riego intermedio (B1 y B2) y riego reducido (C1 y C2).

Se aprecia que no existe correlación significativa en ninguna de las evaluaciones realizadas, aunque se aprecia ligeramente en el tratamiento de riego normal y en menor cantidad en riego intermedio.

Fonseca y Westgate (2005) dicen que la exitosa fertilización de los óvulos requiere de polen viable que aterrice sobre estigmas receptivos. A pesar de que esto resulta lógicamente correcto, no coincide con lo observado en el presente trabajo, puesto que no se encontró correlación alguna y en las que medianamente se observa esta resulta ser negativa pero no significativa, además se observan híbridos que manifestaron un porcentaje de viabilidad alto y rendimientos por debajo de la media, así mismo son detectados híbridos con baja viabilidad y los mejores rendimientos.

Los resultados encontrados en este trabajo se deben posiblemente a que el estrés hídrico aumenta el intervalo entre la antesis y la floración femenina y es por eso que a pesar de que las plantas presentaron polen viable, al momento de que este fue liberado no se encontraron estigmas receptivos para él.

Prasad *et al.*, (2001) advierten que en varios cultivos, existen antecedentes de efectos directos de breves periodos de estrés térmico e hídrico en el desarrollo, funcionalidad y supervivencia de los órganos reproductivos. Resultados coincidentes son observados en el trabajo aquí presentado puesto que se observa que a medida

que el estrés aumenta hay una reducción en cuanto al porcentaje de viabilidad. Lo mismo ocurre con el cambio en la hora de la toma, pues se observa mayor viabilidad en la toma de las 9:00 de la mañana que en la de la 1:00 de la tarde y esto es atribuible mayormente al aumento en la temperatura diaria y a la incidencia del sol.

Esto también es respaldado por Stone (2001) que dice que la viabilidad de polen declina con el aumento de las temperaturas, además de que se ha demostrado que temperaturas arriba de los 35-38°C hacen perder la viabilidad del polen de maíz.

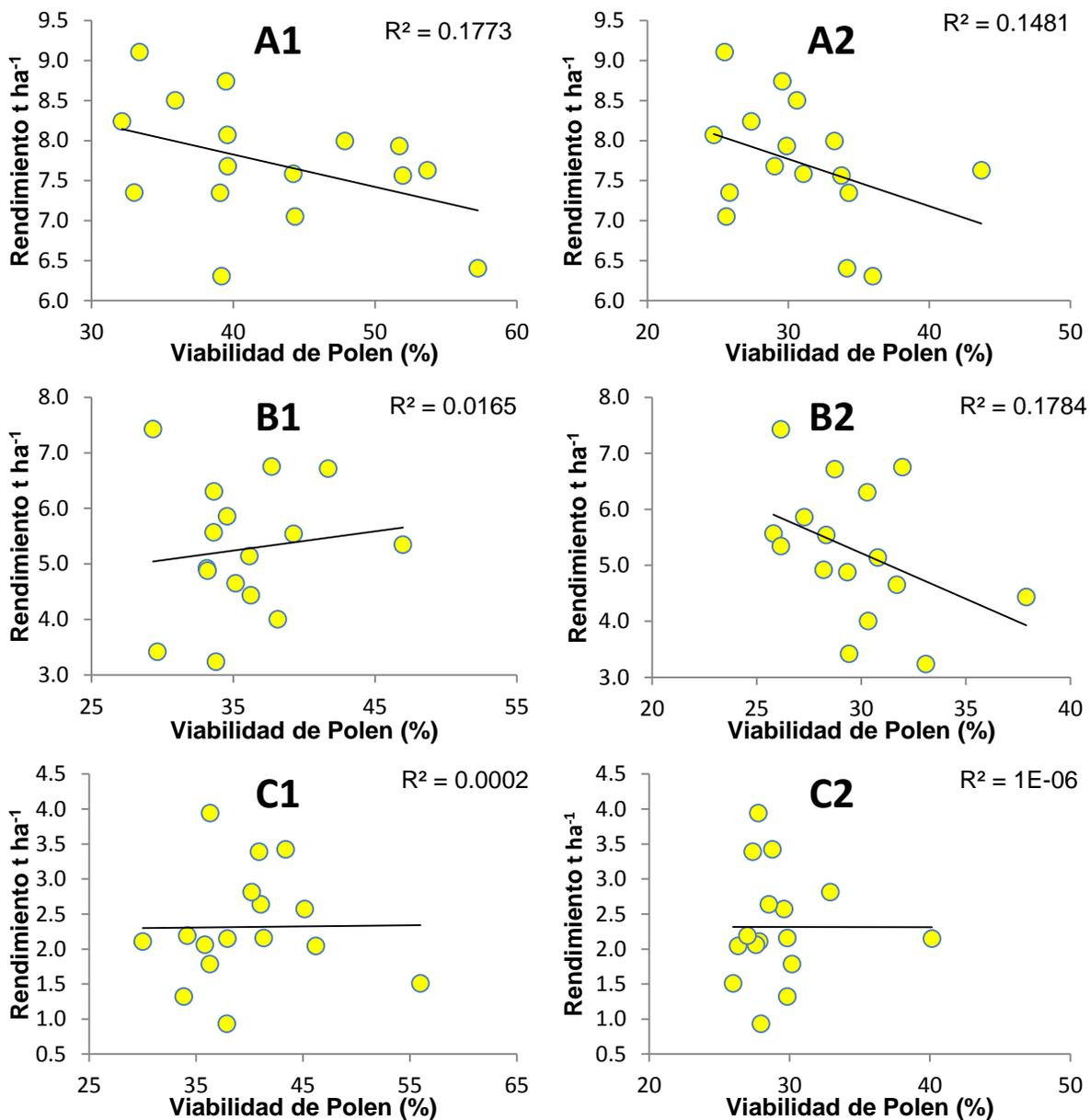


Figura 4.12. Relación entre el rendimiento y la viabilidad de polen evaluada al segundo día después de floración en dos diferentes horas del día (9:00(1)) y (13:00(2)) en 16 híbridos de maíz para los tratamientos de riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C). CIMMYT 2014.

#### 4.4.13. Relación del rendimiento con la madurez fisiológica en maíz

La etapa de madurez fisiológica se caracteriza por que todos los granos de la mazorca han alcanzado el máximo peso. La figura 4.13 muestra la relación encontrada entre el rendimiento y la madurez fisiológica evaluada en el tratamiento riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C).

En esta se observa que existe una correlación significativa y positiva entre estos dos parámetros para el tratamiento de riego normal. Se detecta que los híbridos que incrementan el intervalo siembra-madurez son los de mayor rendimiento. Esto se debe posiblemente a que al estar la planta en condiciones óptimas de desarrollo y que el tiempo a madurez sea mayor le permite interceptar más cantidad de nutrientes para la mazorca y con esto aumentar el tamaño y número de granos y por efecto el rendimiento. Estos resultados coinciden con Llera y Cruz (2014) que encontraron que el rendimiento de grano están relacionados positiva y significativamente con el intervalo entre siembra y madurez fisiológica ( $R^2= 0.8701$ ) en evaluaciones realizadas en triticale.

Para el tratamiento de riego intermedio se aprecia que existe una correlación alta y significativa entre estos dos parámetros y que además esta es negativa, es decir que a medida que el intervalo siembra-madurez fisiológica aumenta el rendimiento decae, posiblemente porque al estar las plantas sometidas a estrés no proporcionan los suficientes nutrientes para el desarrollo de la mazorca y al ser más grande el intervalo es mayor el tiempo que las plantas pasan en estas condiciones.

En el tratamiento de riego reducido se observa una correlación baja, no significativa y negativa, se detecta que los días a madurez fisiológica no influyen en

el rendimiento pues se encontraron híbridos que incrementan su intervalo pero tienen rendimientos muy bajos y, también híbridos con el mismo intervalo siembra-madurez que los anteriores pero son de los mejores en cuanto a rendimiento.

También se puede apreciar que a medida que el estrés aumenta el intervalo entre la siembra y la madurez fisiológica tiende a ser menor esto debido a que al sentir la planta estrés acelera su proceso fisiológico para lograr producir órganos reproductivos y asegurar su supervivencia.

La interacción entre madurez fisiológica y rendimiento puede ser mejor estudiada tomando en cuenta para esto los días a floración, puesto que es la magnitud de este intervalo (floración-madurez fisiológica) el que realmente determina la cantidad y calidad de los nutrientes suministrados.

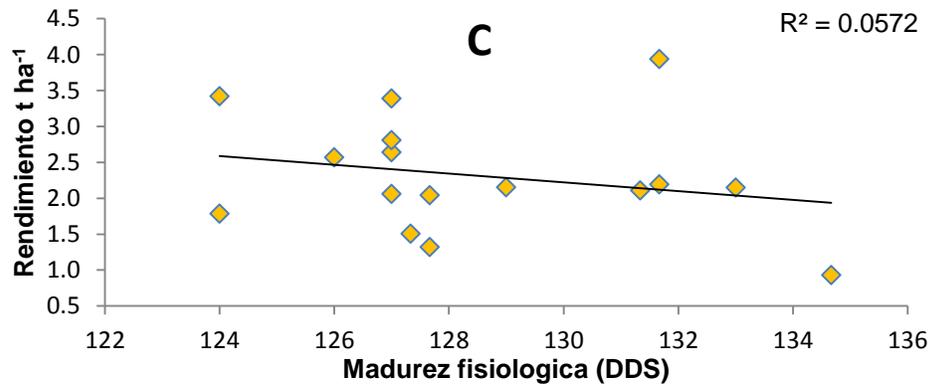
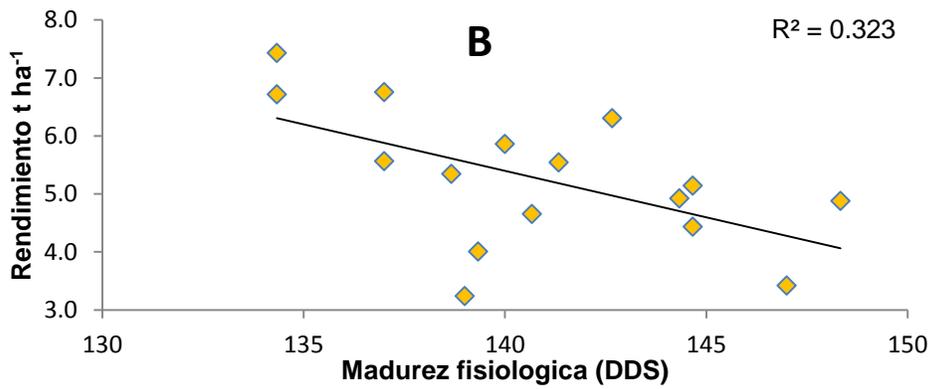
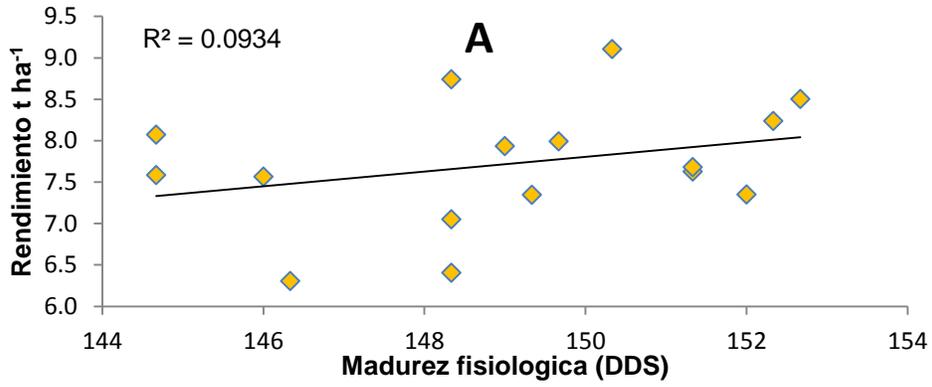


Figura 4.13. Relación entre el rendimiento y la madurez fisiológica evaluada en 16 híbridos de maíz para los tratamientos riego normal (A), riego intermedio (B) y riego reducido (C). CIMMYT 2014.

## V. CONCLUSIONES

En general en el presente trabajo se observa que la mayoría de las variables presentan una gran diferencia entre tratamientos y entre genotipos, pero que estos no siempre están asociados con los rendimientos.

Por otro lado se detecta que valores bajos en variables como ASI y precocidad medida a través de la floración masculina y madurez fisiología y valores altos en cuanto a contenido de clorofila influyen en gran medida en el rendimiento, puesto que los híbridos con estos valores son los de mayor rendimiento.

En cuanto a la heredabilidad, la mayoría de las variables presenta valores altos por lo que pueden ser considerados en futuras evaluaciones para conseguir un mayor avance en el mejoramiento genético enfocado a la tolerancia a sequía.

Los resultados obtenidos muestran que la relación entre el rendimiento y NDVI en las diferentes etapas de desarrollo para el tratamiento de riego normal resultó ser positiva, en tanto para los tratamientos afectados por estrés se observó existencia de mayor correlación en el tratamiento de riego intermedio mientras que el estrés extremo imposibilita que la correlación sea manifestada.

Entre rendimiento y SPAD se observó que no existe correlación para el tratamiento de riego normal, mientras que para los tratamientos con estrés aumento ligeramente y en mayor medida en las últimas tomas a los 45 y 60 días después de floración.

Para las variables NDVI y SPAD que son las que tienen que ver con el estado verde de la planta y la cantidad de clorofila se aprecia que conforme aumento el estrés los valores de correlación disminuyeron.

En la relación de enrollamiento foliar con rendimiento se observa que esta es prácticamente inexistente y que aumenta ligeramente en el tratamiento de riego reducido pero de una manera negativa.

La relación entre senescencia y rendimiento no presentó correlación significativa en ninguno de los tratamientos pero se detecta en el tratamiento de riego reducido que prácticamente no existe correlación.

Los valores de enrollamiento y senescencia aumentan conforme aumenta el estrés.

En cuanto a los valores de ASI estos muestran ser una variable importante de cuantificar ya que muestra una muy alta correlación con el rendimiento, además de que se identifica con mucha claridad que este es fuertemente influenciado por el estrés causado por sequía.

En el caso de la viabilidad de polen se observó que el estrés y el calor ocurridos durante el ciclo del cultivo afectaron negativamente esta variable, así mismo se observó que no existe correlación entre este y el rendimiento, salvo para una toma realizada a las 13:00 horas en el tratamiento riego intermedio.

En la asociación del rendimiento con la madurez fisiológica se observó que la correlación se manifestó únicamente en el tratamiento de riego intermedio, así mismo se observó que el estrés disminuye el intervalo siembra-madurez fisiológica, la evaluación de esta variable tendría un mejor resultado si se utilizara para ello el intervalo floración-madurez en lugar del utilizado en este trabajo (siembra-madurez).

Los mejores híbridos encontrados en el tratamiento de riego normal fueron el "DTMA 155", "DTMA 60" y el "DTMA 179" puesto que presentaron los mejores valores en las variables evaluadas, así como en el rendimiento promedio, en este mismo ámbito los híbridos "DTMA 85", "DTMA 209" y "DTMA 237" fueron los mejores

en el tratamiento riego intermedio, por su parte los híbridos “DTMA 287”, “DTMA 237” y “DTMA 209” fueron los que presentaron los mejores resultados en el tratamiento riego reducido. Con esto se observa que los híbridos que resultan ser los de mejor rendimiento en condiciones óptimas no lo son en condiciones con estrés y por ello se resalta la importancia de realizar el mejoramiento enfocado a tolerancia a algún tipo de estrés en las mismas condiciones en las que se encontrará la planta en la zona objetivo.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, FH. Cirilo, A. Uhart, S. Otegui, ME. 1996. Eco fisiología del cultivo de maíz. Balcarce: La Barrosa, INTA Balcarce, FCA UNMP, Dekalbpres. 292p.
- Arunyanark A, S Jogloy, C Akkasaeng, N Vorasoot, T Kesmala, R C Nageswara Rao, G C Wright, A Patanothai (2008) Chlorophyll stability is an indicator of drought tolerance in peanut. J. Agron. Crop Sci. 194:113-125.
- Avendaño, ACH. Trejo, LC. López, CC. Molina, GJD. Cadena, IJ. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz (*Zea mays* L.). 19(1):27 37.
- Banziger, M. Edmeades, G.O. Beck, D. y Bellon, M. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz: De la teoría a la práctica: México, D.F.: CIMMYT.
- Banziger, M. y Lafitte, H.R 1997. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. Crop Science 37:1110-1117.
- Blackmer, T. M.Y Schepers, J.S 1995. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. Journal of Production Agriculture, 8: 56-60.
- Bolaños, J. Edmeades, G. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. Developing drought- and low N-tolerant maize. Proceedings of a Symposium. CIMMYT, El Batán, México. G. O. Technical Editors. pp. 355-368.
- Bolaños, J y Edmeades, G.O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. Field crops Research 48:65-80.
- Bolaños, J. Edmeades, G.O. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. Field Crops Research, Amsterdam, v.31, p.233-252.
- Bootsma, A. Boisvert, J. Baier, R. 1996. La Secheresse et L agriculture Canadienne; une revue des MpyensDáction. Sécheresse. Vol, 7. No.4 pp.227-285.
- Borras, L. Slafer, G.A. Otegui, M.E. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean. A quantitative reappraisal. Field Crops Research. 86:131-146.
- Bray, E.A. 1991. Regulation of gene expression by endogenous ABA during drought stress. pp. 81-96. En: Davies, W.J. y H.G. Jones (eds.). Abscisic acid, physiology and biochemistry. Bios Scientific Publisher, Lancaster, UK.

- Buchanan- Wollaston, V. Earl, S. Harrison, E. 2003. The molecular analysis of plant senescence – a genomics approach. *Plant Biotechnology Journal* 1: 3–22.
- Cafaro, M.J. 2005. Inducción de la senescencia en plantas de trigo y arroz. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Belgrano. Buenos Aires, Argentina.
- Calera, A. Belmonte, A.M. Jochum, A. 2003. Space – assisted irrigation management: Towards user – friendly products. ICID Workshop on Remote Sensing of Crop Evapotranspiration, Montpellier, Francia. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 337–353.
- Campos, H., Cooper, M., Edmeades, G.O., Loffler, C., Schussler, J.R., and Ibanez M. 2006. Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the U.S. Corn Belt. *Maydica*. 51:369-381.
- Campuzano, F. y Navas, A. 2014. Cultivo de Maíz. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Bogotá, Colombia.
- Cardellino, G. Baethgen, W.E. 2000. Análisis de viabilidad de sistemas de riego para maíz: Estudio de casos y evaluación de estrategias. En: *Tecnología de producción de cultivos y pasturas*. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 227). pp. 47 - 55.
- Carlson, N.T. y Ripley, D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- Castañon, G. Cruz, R. Del Pino, R. Panzo, E. Montiel, M. Filobello, L. 2000. Selección de líneas de maíz por resistencia a sequía. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA* 11(1): 163-169. Veracruz, México.
- Castillo, R.A. Ligarreto, A.G. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el pie de monte llanero colombiano. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. Pp. 11(2), 122-128.
- Ceniceros, C.C. 2013. Evaluación del enrollamiento y fogueo del maíz (*Zea mays* L.) comparados con el rendimiento en condiciones de stress. Tesis de licenciatura. Torreón, Coahuila. Pp 26-34.
- Chandler, M.P. y Robertson, M. 1994. Gene expression regulated by abscisic acid and it's relation to stress tolerance. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 45, 113-141.
- Chang, J., D.E. Clay, K. Dalsted, S. Clay, and M. O'Neill. 2003. Corn (*Zea mays* L.) yield prediction using multispectral and multirate reflectance. *Agron. J.* 95:1447-1453.
- Dale, R.F., and J.A. Daniels. 1995. A weather-soil variable for estimating soil moisture stress and corn yield probabilities. *Agron. J.* 87:1115-1121.

- Debata, A. y Murty, K.S. 1983. Effect of foliar application of nitrogen, phosphorus and potassium salts on flag leaf senescence in rice. *Agric. Sci. Dig.* 1: 23-26.
- Doraiswamy, P.C. Moulin, S. Cook, P.W. y Stern, A. 2003. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69(6):665-674.
- Dwyer, L. M. Tollenaar, M. y Houwing, L. 1991. A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn. *Canadian Journal of Plant Science*, 71: 505-509.
- Edmeades, G.O., Bolaños, J., Banziger, M., Ribaut, J.M., White, J.W., Reynolds, M.P., Lafitte, H.R. 1998. Improving crop yields under water deficits in the tropics. In V.L. Chopra, R.B. Singh y A. Varma (eds.), *Crop Productivity and Sustainability-Shaping the Future*. Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Crop Science Congress, 437-451. Nueva Delhi: Oxford e IBH.
- Evans, L.T. 2010. Las plantas y el agua. Texto elaborado por la catedra de fisiología vegetal. Facultad de agronomía. Pp.61-63.
- Feller, U. y Fischer, A. 1994. Nitrogen metabolism in senescing leaves. *Critical Reviews in Plant. Sciences.* 13 (3): 241-173.
- Fischer, K. S.; Johnson,E.; Edmeades,G. 1984. Mejoramiento y selección de maíz tropical para incrementar su resistencia a la sequía. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), El Batán, México. 20 p.
- Fischer, K.S. Edmeades, G. Johnson, E. 1989. Selection for the improvement of maize yields under water deficits. *Field Crops Res.*, 22:227 243.
- Fonseca, A. E. y Westgate, M.E. 2005. Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research*, 94: 114-125.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2014. Maíz producción mundial 2014-15. Rome.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 1993. El maíz en la nutrición humana. Colección FAO: alimentación y nutrición. N° 25.
- Fotovat, R.M. Valizadeh, M. Toorchi .2007. Association between wateruse efficiency components and total chlorophyll content (SPAD) in wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and drought stress conditions. *J. Food Agric. Environ.* 5:225-227.
- Galau, G.A., Hughes, D.W., y Dure, L. 1986. Abscisic acid induction of cloned cotton late embryogenesis abundant (lea) mRNAs. *Plant Mol. Biol.* 7, 155-170.
- Gambín, B.L., Borrás, L., Otegui, M.E. 2006. Source–sink relations and kernel weight differences in maize temperate hybrids. *Field Crops Research.* 95, 316-326.

- Gamón, I.A. Serrano, L. y Sorfus, J. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types and nutrient levels. *Ecologia* 112: 492-511.
- González A. 2009. Aplicación del medidor portátil de clorofila en programas de mejora de trigo y cebada. *Agroecología* 4: 111-116.
- Gonzales, A. 2001. Aplicación del medidor portatil de clorofila en programas de mejora de trigo y cebada. Instituto madrileño de investigación y desarrollo rural agrario y alimentario. Madrid, España. 111-116.
- Gutiérrez, M.G. Cadet., E. Rodríguez, W. Araya, J.M. 2011. El GreenSeeker y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. Alajuela, Costa Rica.
- Gutiérrez, S. Luna, M. 1989. Selección para resistencia a sequía en un compuesto de maíz en Zacatecas. *rev. Fitot. Mex.* 12(2): 94-104.
- Guzmán, H.C. 2013. Interacción de características fisiológicas y rendimiento en mestizos de maíz (*Zea mays* L.) evaluadas en condiciones de riego-sequía. Tesis de licenciatura. Torreón, Coahuila. Pp. 1, 3, 6 y 17.
- Hasperué, H.J. 2012. Rol del metabolismo de hidratos de carbono en la senescencia postcosecha de brócoli. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- Hernández, O.N. 2013. El estrés en las plantas; una revisión. Torreón, Coahuila, México.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 7:1417-1434.
- Jiang, Y. Huang, B. 2000. Effects of drought or heat stress alone and in combination on Kentucky bluegrass. *Crop Sci.* 40:1358-1362.
- Kitbamroong, C.H. Chantachume, Y. 1992. Corn improvement for drought tolerance. Adaptation of food crops to temperature and water stress. Proceedings of an international symposium. Taiwan. C. George Kuo, Editor pp. 354-359.
- Kumar, R. y Silva, L. 1973. Light ray tracing through a leaf cross- section. *Appl. Optics* 12: 2950-2954.
- Lafitte, H.R. Edmeades, G.O.1995. Stress tolerance in tropical maize is linked to constitutive changes in ear growth characteristics. *Crop Sci.*, 35: 820-826.
- Leung, J. y Giraudat, J. 1998. Abscisic acid signal transduction. *Ann. Rev. plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49, 199-222.
- Li, J.R. Yu, K. Wei, J.R. 2010. Gibberellin retards chlorophyll degradation during senescence of *Paris polyphylla*. *Biologic plantarum* 54: 395-399.

- Llera, F. y Cruz, V. 2014. Influencia del ambiente en el rendimiento de forraje y grano de triticale. 53ª reunión científica de la SEEP. Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura. Guadajira, Badajoz, España.
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M.D., Falcon, W.P., Naylor, R.L. 2008. Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*. 319, 607-610.
- Ludlow, M.M. y Muchow, R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in waterlimited environments. *Advances in agronomy* 43:107-153.
- Martin, K. L. Raun, W.R. Freeman, K.W. Teal, R.K. Desta, K. Arnall, D.B. Tubaña, B. Solie, J.B. Stone, M.L. 2007. Expression of spatial variability in corn (*Zea mays* L.) as influenced by growth stage using optical sensor measurements. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma. *Agron J.* 99:384-389.
- Mazzilli, S. 2012. Fisiología “maíz y sorgo”. Curso de fisiología de cultivos 2012. México, DF.
- Mendoza, M. C. Mosqueda, J.A. Rangel, A. López, S.A. Rodríguez, L. Moreno, E. 2006. Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura técnica en México*. Vol. 32 Num. 1 p.89-99. Saltillo Coahuila.
- Meyer, S.J., K.G. Hubbard, and D.A. Wilhite. 1993. A crop-specific drought index for corn. I. Model development and validation. *Agron. J.* 85:388-395.
- Nilsen, E.T. y Orcutt, D.M. 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors.* John Wiley and Sons, New York, NY.
- Noodén, L.D. y Guiamét, J.J. 1989. Regulation of assimilation and senescence by the fruit in monocarpic plants. *Physiol. Plant* 77: 267-274.
- Oppenheimer, H. 1961. Adaptation to drought: Xerophytism. In *recherché sur la zone aride. Echanges hydriques plantas en milieuaride aun semi-aride.* Compterendu de recherches. Paris. Pp. 105-138.
- Pavón, C.A. 2013. Generalidades del cultivo del maíz. Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz. Anejo V.
- Pelacho, A.M., Slafer, G.A., Savin, P.R. 2008. Mitigar el efecto de altas temperaturas en la productividad de maíz. Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria. Lleida, España.
- Peña, R. A. Martín del Campo, S. V. 1993. Selección de líneas y respuesta de variedades de maíz bajo condiciones ambientales diferentes. *Rev. Fitot. Mex.* 16(1):47-56.
- Pennell, R.I. Lamb, C. 1997. Programmed cell death in plants. *Plant Cell* 9;1157-1168 *Plant Physiol.* 34: 81-111.

- Piekielek, W. P. y Fox, R.H. 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal*, 84: 59-65.
- Potters, G. Pasternak, T.P. Guisez, Y. Palme, K.J. y Jansen, M.A.K. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3), 99-105.
- Prasad, P.V.V. Craufurd, P.Q. Kakani, V.G. Wheeler, T.R. Boote, K.J. 2001. Influence of high temperature during pre- and post-anthesis stages of floral development on fruit-set and pollen germination in peanut *Functional. Plant Biology.* 28, 233-240.
- Ramírez, J.A. 2013. Comparación entre NDVI, senescencia, SPAD en maíz (*Zea mays* L) evaluadas en condiciones de riego-sequia. Tesis de Licenciatura. Torreón Coahuila. Pp.13.
- Raun, W.R. Johnson, G.V. Stone, M.L. Sollie, J.B. Lukina, E.V. Thomason, W.E. Schepers, J.S. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93:131-138.
- Reynolds, M.P. Delgado M.I. Gutiérrez-Rodríguez, M. Larque-Saavedra, A. 2000. Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment. I. Genetic diversity and crop productivity. *Field Crops Research* 66:37-50.
- Rudorff, B.F.T. y Batista, G.T. 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sensing Environ.* 31: 53-63.
- Salinas, M. Gonzales, H. 2002. Potencial hídrico y ácido abscísico en hoja, jilote, y espiga de maíz sometidas a sequía. *Agricultura Técnica en México.* Vol. 29. Número 002. Instituto nacional de investigaciones agrícolas y pecuarias, Texcoco, México. Pp. 131-143.
- Salles, L.A. Ramos, J.D. Pasqual, M. Junqueira, K.P. y Bortolotti da Silva, A. 2006. Sacarose e pH na germinação *in vitro* de grãos de pólen de citros. *Ciência e Agrotecnologia* 30:170-174.
- Sawchik, J. Formoso, F. 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. En: *Tecnología de producción de cultivos y pasturas.* Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión; 227). pp.13 - 25.
- Shao, H.B. Chu, L.Y. Jaleel, C.A. y Zhao, C.X. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.
- Stone, P. 2001. The effects of heat stress on cereal yield and quality. In *Crop responses and adaptations to temperature stress*, edited by Amarjit S. Basra, 243-291. Binghamton, NY: The Haworth Press.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology.* 4th ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.

- Teal, R. K. Tubana, B. Girma, K. Freeman, K.W. Arnall, D.B. 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agron. J.* 96:1139–1147.
- Valdivia, L.R. 2011. Cosecha y postcosecha en el cultivo de maíz. Agricultura para necesidades básicas. Catholic Relief Services.
- Valentinuz, O.R. Tollenaar, M. 2004. Vertical profile of leaf senescence during the grain-filling period in older and newer maize hybrids. *Crop Sci.* 44:827-834.
- Velasco, I. Ochoa, L. Gutiérrez, C. 2005. Sequía, un problema de perspectiva y gestión. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Verhulst, N. Govaerts, B. Nelissen, V. Sayre, K.D. Crossa, J. Raes, D. Deckers, J. 2011. The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research* 120: 58-67.
- Verhulst, N. Govaerts, B. Fuentes Ponce, M. 2010. Sensor portátil GreenSeeker para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): Una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. Parte A: Conceptos y estudios de caso. México, D.F.; CIMMYT.
- Weiss, M. Troufleau, D. Baret, F. Chauki, H. Prévot, L. Olioso, A. 2001. Coupling canopy functioning and radiative transfer models for remote sensing data assimilation. *Agric. For. Meteorol.* 108:113-128.
- Westgate, M.E., Otegui, M.E., Andrade, F.H. 2004. Physiology of the corn plant. In: W. C. Smith, J. Betrán, and E. Runge (eds.), *Corn: Origin, History, Technology, and Production*. John Wiley and Sons, pp. 235-271.
- Wiegand, C.L. y Richardson, A.J. 1990. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield. II. Results. *Agron. J.* 82: 630-636.
- Zarco, P.E. Gonzales, H. López, P. Salinas, M. 2004. Marcadores fisiológicos de la tolerancia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Fisiología vegetal*. Campus Montecillo. Montecillo, Estado de México.
- Zeevaart, J.A.D. y Creelmen, R.A. 1988. Metabolism and physiology of abscisic acid. *Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 39, 439-473.
- Zhang S.Q. y Outlaw, W.H. 2001. Abscisic acid introduced into the transpiration stream accumulates in the guard cell apoplast and causes stomatal closure. *Plant Cell Environ.* 24, 1045-1054.