

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Comparación de Diferentes Indices de Tolerancia a la Sequía en Triticale
(X *Triticosecale* Wittmack)

Por:

LUIS ANGEL BAEZA SAGRERO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Comparación de Diferentes Índices de Tolerancia a la Sequía en Triticale
(X *Triticosecale* Wittmack)

Por:


LUIS ANGEL BAEZA SAGRERO

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN


Aprobada por el Comité de Asesoría


Dr. Alejandro Javier Lozano del Río
Asesor Principal


Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos
Coasesor


M.C. Modesto Colín Rico
Coasesor


Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía


Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre 2017



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi asesor el Dr. Alejandro Javier Lozano del Río por haberme dado la oportunidad de trabajar con él en el proceso de mi formación como ingeniero agrónomo. Por esa gran amistad que me ha brindado y su apoyo incondicional, muchas gracias Doctor ha sido un ejemplo para mi formación.

A Dr. Carlos Javier Lozano Cavazos y el M.C. Modesto Colín Rico que forman parte del comité de la tesis y por haberme dado la oportunidad de ser su asesorado.

A mi Alma mater por haberme dado la enseñanza y la oportunidad de estar aquí.

Agradezco especialmente de corazón a dos personas que han contribuido mucho en mi formación académica. Al Ing. Miguel Ángel López Martínez y su esposa Diana Yazmin Rangel García por haber sido mis asesores, tutores, vecinos y padrinos en el proceso de mi formación y por sus consejos que me daban en su momento. Gracias por todo su apoyo a los dos y por haber aparecido en mi vida y ser parte de ella, saben que ustedes son mis papás adoptivos de aquí de Saltillo y sin ustedes no se que hubiera pasado en mi vida, por eso y más, muchas gracias, padrinos, los quiero mucho.

Quiero agradecer Al M.C. Juan Espinosa Gutiérrez quien fue la persona que me mencionó esta gran universidad y la motivación de haber elegido la carrera en la que hoy concluyo mis estudios.

A mis padres Crisostomo Baeza Alcántara y Alma Delia Sagrero Gómez por su apoyo y los consejos que me daban durante el proceso de mi formación como ingeniero. Gracias padres a ustedes soy ahora una persona con profesión.

A mi tía Zayra Sagrero Gómez por haberme apoyado incondicionalmente cuando viajaba a casa, por sus consejos que me dió en su momento y el cariño de una segunda madre, por eso y más, muchas gracias Tía More.

A mi madrina Lic. Agustina Domínguez Pascual por su apoyo moral y económico y los consejos que me dió.

A mis tíos Teodoro Sagrero Pascual (†) y Cristina Ramírez Sánchez y sus hijos, quienes me apoyaron muchísimo y de corazón les agradezco tíos.

A mi primo Serafín Bautista Baeza por su apoyo moral y económico así como los consejos que me daba cuando viajaba a casa en el tráiler y la compañía que me diste primo muchas gracias por todo tu apoyo.

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico especialmente a una personita que ha sido la motivación, y por ser el origen de todo. Mis logros y mis ganas de ser lo que soy ahora son por ti.

A mi hija Génesis Baeza Rodríguez que ha sido mi motivación para sacar adelante todo esto y que gracias a ti y a ese sueño de tenerte un día en mis brazos lo he logrado. Te amo, hija.

A mi Novia y futura esposa María Matilde Rodríguez Cerda que me diste la oportunidad de estar a tu lado y me ayudaste a ser una buena persona y a creer en mi mismo cuando más lo necesite, dándome amor y felicidad. Por haberme acompañado en este proceso de formación y estar conmigo en las buenas y malas, por todo eso y más muchas gracias amor. Te amo.

A mi padre Crisóstomo Beza Alcántara quien me apoyó desde que nací y hasta la fecha a pesar de las bajas y altas de nuestra relación, aun estás aquí para orientarme. Por los consejos que diste durante el proceso de formación y por tu apoyo incondicional y esta herencia que me has dejado muchas gracias, PAPA.

A mi madre Alma Delia Sagrero Gómez por sus consejos y apoyo que me brindo y la fe depositada en mí para lograr este objetivo. Por todo su amor y cariño que me dió, por eso y más, muchas gracias, MAMA.

A mis hermanos Giovanni y principalmente a ti, Yahir Uriel que me diste motivaciones para concluir mi profesión y parte de las fuerzas para lograrlo.

A mi bisabuela (†) Ambrosia Gutiérrez por haberme dado su apoyo en vida y las motivaciones más humildes que una persona puede dar. Gracias abuela, desde donde esté, le agradezco infinitamente ese cariño y afecto que solo usted sabía dar.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
CONTENIDO	iii
INDICE DE CUADROS	v
INDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
I. INTRODUCCION	1
Objetivos.....	1
Hipótesis.....	2
II. REVISION DE LITERATURA	3
Introducción.....	3
Generalidades del cultivo de triticale.....	3
Tipos de triticale forrajero.....	4
Estrés abióticos.....	5
Indices de tolerancia a la sequía.....	8
III. MATERIALES Y METODOS	12
Localización de los sitios experimentales.....	12
Material genético utilizado.....	12
Establecimiento de los experimentos.....	12
Tamaño de parcela.....	13
Control de plagas, enfermedades y malezas.....	13
Diseño experimental utilizado en campo.....	15

Análisis estadísticos.....	15
Modelo estadístico de los análisis de varianza individuales	15
Comparación de medias.....	16
Variables registradas.....	17
Variable de rendimiento.....	17
Indices de tolerancia a sequía.....	17
IV. RESULTADOS	20
Resultados de los análisis de varianza entre tratamientos para las variables estudiadas.....	20
Resultados de las pruebas de comparación de medias entre tratamientos.....	20
Resultados de los análisis de varianza entre grupos para las variables estudiadas.....	22
Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos.....	22
V. DISCUSIÓN	26
V. CONCLUSIONES	30
VI.LITERATURA CITADA	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.		Pág.
3.1	Cuadro 3.1 Lista y sorteo de genotipos utilizados en el Experimento. Zaragoza, Coahuila y Navidad, Nuevo León. Ciclo otoño-invierno 2012 - 2013.....	14
3.2	Manejo agronómico de los ambientes de evaluación.....	15
4.1	Cuadrados medios y significancia de los análisis de varianza entre tratamientos de las variables en estudio.....	23
4.2	Resultados de las pruebas de comparación de medias entre tratamientos de las variables en estudio.....	24
4.3	Cuadrados medios y significancia del análisis de varianza entre grupos de genotipos.....	25
4.4	Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos.....	25

INDICE DE FIGURAS

Figuras		Pág.
4.1	Representación gráfica del rendimiento de grano de los diferentes grupos de genotipos en el ambiente óptimo y en el de estrés de sequía.....	28
4.2	Representación gráfica de los valores por grupo de los diferentes índices de tolerancia a sequía utilizados en este estudio	29
4.3	Representación gráfica de los valores por grupo de los diferentes índices de tolerancia a sequía utilizados en este estudio.....	29

RESUMEN

El más importante factor abiótico que limita el crecimiento de los cultivos es la disponibilidad de agua. A este respecto, el triticale (*X Triticosecale* Wittmack), es uno de los cereales más exitosos hechos por el hombre y fue sintetizado para obtener una planta que combinara la singular calidad del grano de trigo con la tolerancia a los estrés abióticos y bióticos del centeno. El comportamiento relativo de los genotipos, tanto en ambientes favorables como con déficits de humedad, es el punto de partida más común en la identificación de características relacionadas con la tolerancia a sequía y la selección de genotipos para su utilización en el mejoramiento para ambientes áridos. El triticale (*X Triticosecale* Wittmack), es uno de los cereales más exitosos hechos por el hombre y fue sintetizado para obtener una planta que combinara la singular calidad del grano de trigo con la tolerancia a los estrés abióticos y bióticos del centeno. Se planteó la presente investigación con el objetivo general de estudiar la relación entre el rendimiento de grano y diversos índices de tolerancia a sequía en 20 genotipos de triticale bajo diferentes niveles de humedad en dos ambientes del norte de México. Se encontró que los ambientes de estudio fueron significativamente contrastantes entre sí, lo que influyó en forma determinante en el comportamiento diferencial de los genotipos en todas las características evaluadas. Los genotipos precoces registraron mayor tolerancia a condiciones de sequía que los genotipos tardíos en base a su rendimiento de grano y el valor de los diferentes índices de tolerancia evaluados. Se concluye que el uso de los diferentes índices de tolerancia a sequía son herramientas útiles en la selección de genotipos con tolerancia a déficits de humedad, particularmente en las zonas áridas del norte y centro de México.

Palabras clave: triticale, rendimiento, índices de tolerancia a sequía.

I. INTRODUCCIÓN

Los pronósticos sobre la creciente población mundial y el cambio climático, que incide en un incremento en las temperaturas y una reducción en la precipitación, producirán un efecto particularmente negativo en la agricultura en muchos países en desarrollo, entre ellos, México, y particularmente en las zonas áridas y semiáridas del norte del país, ya que el más importante factor abiótico que limita el crecimiento de los cultivos es la disponibilidad de agua. El rendimiento es el principal índice de selección bajo condiciones de estrés de humedad. A este respecto, el triticale (*X Triticosecale* Wittmack), es uno de los cereales más exitosos hechos por el hombre y fue sintetizado para obtener una planta que combinara la singular calidad del grano de trigo con la tolerancia a los estrés abióticos y bióticos del centeno. Se ha reportado que tiene tolerancia superior a sequía, bajas temperaturas, baja disponibilidad de nutrientes, suelos ácidos, aluminio y suelos salinos. Por otra parte, el comportamiento relativo de los genotipos, tanto en ambientes favorables como con déficits de humedad, es el punto de partida más común en la identificación de características relacionadas con la tolerancia a sequía y la selección de genotipos para su utilización en el mejoramiento para ambientes áridos. Tomando en cuenta las circunstancias anteriores, el potencial de las nuevas variedades forrajeras de este cultivo y las condiciones para la producción agrícola en el norte y centro de México, donde se requiere de especies y variedades con mayor eficiencia en la producción de biomasa y/o grano con menores niveles de humedad, se planteó la presente investigación con el objetivo general de estudiar la relación entre el rendimiento de grano y diversos índices de tolerancia a sequía en 20 genotipos de triticale bajo diferentes niveles de humedad en dos ambientes del norte de México, con los siguientes objetivos específicos:

Objetivos

1.- Identificar genotipos individuales que rindan una mayor producción de grano tanto en ambientes óptimos como con déficits de humedad en el norte de México.

2.- Identificar grupos de genotipos por hábito de crecimiento que rindan una mayor producción de grano tanto en ambientes óptimos como con déficits de humedad en el norte de México.

3.- Identificar genotipos con tolerancia a déficits de humedad mediante diferentes índices de tolerancia a sequía.

4.- Identificar grupos de genotipos con tolerancia a déficits de humedad mediante diferentes índices de tolerancia a sequía.

Hipótesis

1.- Cuando menos uno de los genotipos presenta una mayor capacidad de rendimiento de grano tanto en ambientes óptimos como con déficits de humedad en el norte de México.

2.- Cuando menos uno de los grupos de genotipos presenta una mayor capacidad de rendimiento de grano tanto en ambientes óptimos como con déficits de humedad en el norte de México.

3.- Cuando menos uno de los genotipos se clasifica como tolerante a la sequía en base a alguno de los diferentes índices de tolerancia a sequía.

4.- Cuando menos uno de los grupos de genotipos se clasifica como tolerante a la sequía en base a alguno de los diferentes índices de tolerancia a sequía.

II. REVISION DE LITERATURA

Introducción

Los estrés abióticos reducen frecuentemente el crecimiento y la productividad de los cultivos como los cereales. El más importante factor abiótico que limita el crecimiento de los cultivos es la disponibilidad de agua (Araus et al, 2002; Lonbani y Arzani, 2011). Al desarrollar un programa de mejoramiento para mejorar la resistencia a sequía es necesario aumentar el conocimiento acerca de la genética y fisiología de los mecanismos de tolerancia (Clarke y Townley-Smith, 1984; Inoue et al, 2004).

La resistencia al estrés de un genotipo es el producto de muchas características morfológicas y fisiológicas para las cuales no se han desarrollado todavía criterios efectivos de selección (Fischer y Maurer, 1978). Por otra parte, el rendimiento de grano y sus componentes permanece como el principal criterio de selección para mejorar la adaptación a un ambiente de estrés en muchos programas de mejoramiento.

El comportamiento relativo de los genotipos en ambientes con y sin estrés de sequía puede utilizarse como indicador de su tolerancia en programas de mejoramiento de cereales para ambientes con déficits de humedad. Se han propuesto varios índices para describir el comportamiento productivo de un genotipo dado bajo condiciones de estrés y no estrés en comparación con el rendimiento promedio o el rendimiento de un genotipo superior.

Generalidades del cultivo de triticales

El triticales (*X Triticosecale* Wittmack), es un cultivo sintético que contribuye con más de 6 millones de toneladas por año a la producción mundial de cereales (Varughese, 1996). Desde hace aproximadamente 40 años, se ha

incrementado el interés en el uso del triticale como forraje a nivel mundial y nacional. Es uno de los cereales más exitosos hechos por el hombre y fue sintetizado para obtener una planta que combinara la singular calidad del grano de trigo con la tolerancia a estrés abióticos y bióticos del centeno. Se ha reportado que tiene tolerancia a menor disponibilidad de nutrientes, sequía, heladas, suelos ácidos, aluminio y salinidad (Lelley, 2006).

Se compara con los mejores trigos en términos de su rendimiento potencial bajo condiciones favorables y con frecuencia son más productivos que muchos trigos cuando se siembran en diferentes tipos de suelos marginales (Ammar et al, 2004). La selección de las variedades está en función de su hábito de crecimiento, características agronómicas y nutricionales, ya que depende de las condiciones ambientales, el manejo y el tipo de explotación.

Tipos de triticale forrajero

Lozano del Río (2002), señala que por su ciclo de crecimiento, capacidad de rebrote y producción, los triticales forrajeros se clasifican como primaverales, intermedios o facultativos e invernales. Los tipos primaverales son de crecimiento rápido, y su utilización es principalmente para ensilaje y henificado, con un desarrollo y producción similar a la avena. Los tipos intermedios o facultativos son relativamente más tardíos que los primaverales, en forma general presentan una mayor relación hoja-tallo que los anteriores. Presentan además una mayor capacidad de rebrote que los primaverales, por lo que pueden ser utilizados en dos cortes para verdeo, o uno para verdeo y el segundo para henificado ó ensilaje. Los tipos invernales, de ciclo tardío, son excelentes en la producción de forraje para cortes o pastoreos múltiples (3 ó 4), debido a su alta capacidad de rebrote, alta calidad nutritiva, con adecuados rendimientos de forraje seco en etapas tempranas en su desarrollo (encañe) y una mayor proporción de hojas en relación a los tallos, en comparación con los triticales facultativos, avenas y trigos.

Por otra parte, para producción de grano, Fox et al (1990) y Royo et al (1995), clasifican a los triticales hexaploides en sólo dos grupos principales (1) tipos invernales, los cuales requieren vernalización para la diferenciación floral, que principalmente se han desarrollado en Europa y (2) tipos primaverales, que no tienen requerimientos de vernalización y han sido desarrollados básicamente por el CIMMYT en México. Ambos grupos son agrónomicamente y morfológicamente diferentes (Fox et al, 1990; Royo et al, 1995). En promedio, los triticales primaverales llegan a la antesis aproximadamente dos semanas antes que los invernales. De esta forma, los genotipos primaverales escapan adecuadamente al estrés terminal de sequía y alta temperatura.

Estrés abióticos

La sequía es uno de los principales obstáculos para la producción de trigo bajo temporal en la región mediterránea y otras regiones geográficas similares, como el norte de México. Se ha reconocido que estos ambientes son un difícil reto para los mejoradores para lograr incrementos en el rendimiento, mientras que en ambientes favorables las ganancias han sido mucho mayores (Richards et al, 2002). También, en ambientes mediterráneos, el estrés por altas temperaturas es un importante factor después de la antesis (Wardlaw et al, 1989). El efecto más obvio de las altas temperaturas sobre el crecimiento de los cereales es la aceleración del desarrollo de la planta y la subsecuente reducción en su tamaño (Midmore et al.1984; Shpiler y Blum, 1986). Diversos autores han reportado incrementos en la respiración (Berry y Bjorkman, 1980); reducción en la fotosíntesis (Al-Katib y Paulsen, 1984; Blum, 1986; Reynolds et al, 2000); inhibición de la síntesis de almidón en los granos en desarrollo (Jenner, 1991); reducción en el número de espigas por planta, número de granos por espiga y menor peso de grano (Warrington et al, 1977), y aceleración de la senescencia en las plantas (Al-Katib y Paulsen, 1984), como resultado del estrés por calor.

Todos estos cambios morfológicos y fisiológicos resultan en reducción del rendimiento bajo condiciones de estrés por calor. En áreas semiáridas, el trigo y otros cereales, como el triticale, se siembran bajo condiciones de temporal, donde se presentan grandes fluctuaciones en la cantidad y frecuencia de la precipitación, entre años y entre localidades dentro de años. El desarrollo de variedades resistentes se ve obstaculizado por la baja heredabilidad de la tolerancia a la sequía y a la carencia de estrategias efectivas de selección (Sio-Se Mardeh et al, 2006). El comportamiento relativo de los genotipos, tanto en ambientes favorables como con déficits de humedad es el punto de partida más común en la identificación de características relacionadas con la tolerancia a sequía y la selección de genotipos para su utilización en el mejoramiento para ambientes áridos (Clarke et al, 1992).

De acuerdo con Fernández (1992), los genotipos pueden dividirse en cuatro grupos basados en su respuesta de rendimiento en condiciones de estrés: (1) genotipos que producen rendimientos altos tanto en estrés hídrico como en condiciones sin estrés (grupo A); (2) genotipos con alto rendimiento bajo condiciones óptimas (grupo B) o estrés (grupo C), y (4), genotipos con bajo comportamiento bajo ambas condiciones (grupo D). Algunos autores señalan que la selección se debe hacer bajo condiciones favorables (Richards, 1996; Van Ginkel et al, 1998; Rajaram y Van Ginkel, 2001; Betran et al, 2003). Por otra parte, algunos autores recomiendan hacer la selección en localidades específicas con condiciones de estrés (Ceccarelli, 1987; Ceccarelli y Grando, 1991; Rathjen, 1994). Otros autores señalan que la selección debe hacerse bajo condiciones tanto favorables como de estrés (Fischer y Maurer, 1978; Nasir Ud-Din et al, 1992; Fernández, 1992; Byrne et al, 1995; Rajaram y Van Ginkel, 2001).

Un buen nivel de precocidad es una efectiva estrategia de mejoramiento para aumentar la estabilidad del rendimiento en ambientes áridos y semiáridos de tipo mediterráneo donde los cereales están expuestos al estrés de sequía

terminal. En estas condiciones, una menor duración del ciclo del cultivo, típica estrategia de escape, puede ser útil al sincronizar el ciclo del cultivo con las condiciones ambientales más favorables.

Un aspecto crucial en todos los estudios dedicados a la tolerancia a sequía es la evaluación del grado de tolerancia de los diferentes genotipos. En muchos estudios, la identificación de variedades tolerantes y susceptibles se basa en pocas medidas fisiológicas relacionadas con la respuesta a sequía. La dificultad para identificar un parámetro fisiológico como indicador confiable del rendimiento en condiciones de aridez sugiere que el comportamiento del rendimiento a través de un rango de ambientes debe utilizarse como el principal indicador de la tolerancia (Voltas et al, 2005).

El logro de ganancia genética para rendimiento bajo estas condiciones ha sido un difícil reto para los mejoradores, en tanto que el progreso ha sido mucho mayor en ambientes favorables (Richards et al, 2002). Sio-Se Mardeh et al (2006), encontraron que el rendimiento de grano bajo riego estuvo inversamente relacionado con el rendimiento bajo temporal, sugiriendo que un alto potencial de rendimiento bajo condiciones óptimas no resulta necesariamente en un mayor rendimiento bajo sequía.

Así, la selección indirecta para ambientes desfavorables basada en los resultados bajo condiciones óptimas no será eficiente. También, Bruckner y Froberg (1987) y Ceccarelli y Grandó (1991), concuerdan con lo anterior, al reportar que variedades criollas de cebada y trigo con bajo potencial de rendimiento fueron más productivas bajo sequía.

El logro de ganancia genética para rendimiento bajo estas condiciones ha sido un difícil reto para los mejoradores, en tanto que el progreso ha sido mucho mayor en ambientes favorables (Richards et al, 2002). En resumen, el rendimiento en un ambiente de estrés depende del rendimiento potencial, susceptibilidad al estrés y escape del mismo (Fischer y Maurer (1978).

Indices de tolerancia a la sequía

Se han propuesto varios índices para describir el comportamiento productivo de un genotipo bajo condiciones de estrés y no estrés, los cuales se basan en la comparación de sus rendimientos bajo condiciones contrastantes de humedad.

Fischer y Maurer (1978) y Clarke et al (1984), propusieron un simple índice de susceptibilidad a la sequía (SSI) que proporciona una medida de la tolerancia de los genotipos a la sequía basado en la disminución del rendimiento bajo estrés cuando se compara con el comportamiento de los genotipos bajo condiciones óptimas. Un valor de SSI menor a la unidad corresponde con una mayor tolerancia a la sequía, ya que la reducción en su rendimiento en condiciones de sequía es menor que la reducción promedio del rendimiento de todos los genotipos (Bruckner y Frohberg, 1987). Este índice se ha utilizado por diversos autores en trigo (Bansal y Sinha, 1991; Cedola et al, 1994; Lazar et al, 1995); cebada (Shakhatreh et al, 2001); triticale (Ozkan et al, 1999) y avena (Larsson y Gorny, 1988).

De acuerdo con Lazar et al (1995), mientras el rendimiento sea el principal objetivo, el SSI puede revelar importantes diferencias en los atributos fundamentales de las plantas. Este índice está basado en la minimización de la pérdida de rendimiento bajo estrés comparada con condiciones óptimas, más bien que sobre el nivel de rendimiento bajo estrés. Genotipos con bajos valores de SSI se consideran tolerantes al estrés, ya que esos genotipos muestran una menor reducción en el rendimiento en ambientes desfavorables comparados con la media de todos los genotipos bajo ambientes sin estrés.

Fischer y Wood (1979), encontraron una correlación entre el SSI y el rendimiento potencial. Sin embargo, Ehdaie y Waines (1988) y Ehdaie y Hall

(1988), reportaron una correlación no significativa entre estos parámetros. En un estudio en trigo (Ozkan et al, 1998), encontraron que los coeficientes de correlación entre SSI y el rendimiento de grano y el peso hectolítrico en ambientes con alto y bajo estrés fueron significativos (-0.72 y 0.36 para rendimiento de grano y -0.79 y -0.34 para peso hectolítrico, respectivamente). Bruckner y Froberg (1987), reportaron en trigo una correlación entre el SSI y el rendimiento bajo estrés, indicando que ambos contribuyen en los ambientes bajo estrés. En el caso de triticales, los materiales menos susceptibles al estrés pueden utilizarse como fuentes de resistencia para mejorar triticales secundarios, con mayor potencial de rendimiento en ambientes desfavorables.

Para identificar genotipos con resistencia a sequía, además del índice de susceptibilidad al estrés (SSI) de Fischer y Maurer (1978), se han propuesto otros índices de selección basados en una relación matemática entre las condiciones favorables y de estrés (Clarke et al, 1984; Huang, 2000). Los siguientes índices se han utilizado bajo diferentes condiciones: tolerancia (TOL) (McCaig y Clarke, 1984; Clarke et al, 1992); productividad media (MP), McCaig y Clarke, (1982); productividad media geométrica (GMP) e índice de tolerancia al estrés (STI), Fernández, (1992). El índice de rendimiento (YI, Gavuzzi et al. 1997) y el índice de estabilidad de rendimiento (YSI, Bouslama y Schapaugh, 1984), fueron propuestos para evaluar la estabilidad de los genotipos tanto bajo estrés como bajo condiciones favorables.

La mayor o menor conveniencia del uso de estos índices depende de la época y severidad del estrés en ambientes con condiciones de sequía. Los índices de tolerancia a sequía proporcionan una medida de la misma basados en la reducción del rendimiento bajo sequía en comparación con el rendimiento bajo condiciones favorables (Mitra, 2001). Estos índices están basados en la resistencia o susceptibilidad de los genotipos (Fernández, 1992). La resistencia a sequía es definida por Hall (1993), como el rendimiento relativo de un genotipo comparado con otros sujetos al mismo estrés. Rosielle y Hamblin

(1981) definieron la tolerancia al estrés (TOL) como las diferencias en rendimiento entre los ambientes bajo estrés y no-estrés, y la productividad media (MP) como el rendimiento promedio de ambos ambientes. Fernández (1992) definió un nuevo índice (índice de tolerancia al estrés, STI), que puede usarse para identificar genotipos que produzcan altos rendimientos bajo ambas condiciones. En su estudio, el rendimiento bajo riego fue casi el doble que el rendimiento bajo estrés. El SSI tuvo una correlación negativa con el rendimiento bajo estrés.

A mayor valor de TOL, es mayor la reducción del rendimiento bajo condiciones de estrés y mayor la sensibilidad a la sequía, Sio-Se Mardeh et al (2006). Esta relación sugiere que la selección basada en TOL resultará en menores rendimientos bajo condiciones de riego óptimo. Resultados similares reportan Clarke et al, (1992) y Rosielle y Hamblin (1981). El rendimiento bajo riego fue casi tres veces mayor que el rendimiento bajo estrés (Sio-Se Mardeh et al, 2006). Ya que MP es la producción media bajo ambas condiciones, no se correlacionará con el rendimiento bajo estrés. Por esta razón la selección para MP no fue capaz de diferenciar genotipos del grupo A.

Hohls (2001), menciona que la selección por MP debe incrementar el rendimiento en ambas condiciones a menos que la correlación entre los rendimientos de los ambientes más contrastantes sea altamente negativa. Hossain et al (1990) utilizó MP como un criterio de resistencia para variedades de trigo bajo estrés moderado. SSI mostró una relación negativa con el rendimiento bajo estrés (Sio-Se Mardeh et al, 2006).

También, Sio-Se Mardeh et al. (2006), no encontraron correlación significativa entre el rendimiento bajo estrés y SSI bajo condiciones moderadas de estrés, mostrando que SSI no discriminará variedades sensibles a sequía bajo tales condiciones. SSI estuvo negativamente correlacionado con el rendimiento de grano bajo estrés, sugiriendo que esta característica puede

contribuir a un mayor rendimiento bajo estrés y disminuye la susceptibilidad al estrés (Fernández, 1992). El SSI se ha usado ampliamente por diversos investigadores para identificar genotipos sensitivos y resistentes a sequía (Clarke et al, 1984, 1992; Fischer y Maurer, 1978; Winter et al, 1988; Sio-Se-Mardeh et al, 2006; Golabadi et al, 2006).

Sio-Se Mardeh et al (2006), reportan que el SSI medio entre localidades y años parece ser una herramienta útil para distinguir variedades resistentes. Cuando el estrés fue severo, se encontró que SSI es un índice útil para discriminar variedades resistentes, aunque ninguno de los índices pudo identificar claramente variedades con alto rendimiento bajo ambas condiciones (variedades grupo A), mientras MP, GMP y STI se sugieren donde el estrés es menos severo.

Sin embargo, los índices anteriores tienen diferentes niveles de precisión, dificultando la comparación entre genotipos. Por otra parte, cada índice debe de ser interpretado de acuerdo a su significado fisiológico y valor óptimo. Por ejemplo, un buen comportamiento de un genotipo tanto bajo condiciones de riego como de sequía lleva a valores altos de STI, MP, GMP YSI y YI; y generalmente, a valores bajos de TOL y SSI.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de los sitios experimentales

El presente estudio se realizó durante el ciclo otoño - invierno 2012-2013 en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN, en Zaragoza, Coah., ubicado geográficamente entre las coordenadas 28° 36´ 25” Latitud Norte y 100° 54´ 35” Longitud Oeste del meridiano de Greenwich, con una altitud de 335 msnm, y durante el verano del 2013 en el Campo Agrícola Experimental de la UAAAN en Navidad, N. L., ubicado entre las coordenadas 25° 04´ Latitud Norte y 100° 56´ Longitud Oeste del meridiano de Greenwich, con una altitud de 1,895 msnm.

Material genético utilizado.

Se evaluaron 20 genotipos de triticale forrajero, incluyendo líneas avanzadas y variedades comerciales testigo, las cuales fueron evaluadas tanto individualmente como agrupadas por su hábito de crecimiento (Cuadro 3.1). Los genotipos fueron proporcionados por el Proyecto Triticale del Programa de Cereales de la UAAAN.

Establecimiento de los Experimentos

En ambas localidades, la preparación del terreno para este experimento consistió en labores para acondicionar el suelo para un buen desarrollo de las plantas, incluyendo barbecho, rastreo doble y nivelación.

Los experimentos de campo fueron conducidos de la siguiente forma en Zaragoza, Coah., donde se evaluaron los genotipos bajo tres diferentes ambientes: 1) Irrigación normal; (riegos a la siembra, amacollamiento, inicio de embuche, floración y llenado de grano), con fertilización; 2) Irrigación normal solo hasta floración, con fertilización; 3) Irrigación normal, con un corte para forraje en la etapa de inicio de encañe y posterior evaluación para grano, con fertilización. En Navidad, N.L., se evaluaron los genotipos bajo dos ambientes durante el verano de 2013: 4) riego de siembra, en inicio de encañe y espigamiento, con fertilización y 5) riego de siembra, en inicio de encañe y espigamiento, sin fertilización (Cuadro 3.2).

Tamaño de parcela

El área experimental para cada unidad experimental en todos los ambientes constó de 6 surcos de 5 m de largo por 30 cm entre hileras (9.0 m²).

Control de plagas, enfermedades y malezas.

En Navidad, N.L., no se presentó incidencia de plagas y enfermedades, por tal motivo, no se hizo ningún tipo de control. En cuanto a la infestación por malezas de hoja ancha, estas se controlaron aplicando 1 lt / ha de Focus en Zaragoza el 15 de Febrero de 2013 utilizando una aspersora portátil de motor; en Navidad, se controlaron las malezas mediante deshierbes manuales.

Cuadro 3.1 Lista y sorteo de genotipos utilizados en el Experimento. Zaragoza, Coahuila y Navidad, Nuevo León. Ciclo otoño-invierno 2012 - 2013.

Trat.	Descripción	R1	R2	R3	R4	Tipo	Grupo
V1	TCLF-65-05	1	25	43	61	Intermedio-Invernal	3
V2	TCLF-66-05	2	37	55	75	Intermedio-Invernal	3
V3	TCLF-184-05	3	32	57	69	Intermedio-Invernal	3
V4	TCLF-185-05	4	24	50	62	Intermedio-Invernal	3
V5	TCLF-203-05	5	34	56	67	Intermedio-Invernal	3
V6	TCLF-204-05	6	36	42	63	Intermedio-Invernal	3
V7	TCLF-24-05	7	23	49	64	Invernal	4
V8	TCLF-70-05	8	31	47	68	Invernal	4
V9	TCLF-75-05	9	27	53	70	Invernal	4
V10	AN-7-2010	10	35	44	80	Primaveral	1
V11	AN-11-2010	11	33	59	71	Primaveral	1
V12	AN-48-2010	12	29	45	77	Primaveral	1
V13	AN-67-2010	13	40	58	73	Primaveral	1
V14	AN-70-2010	14	26	46	74	Primaveral	1
V15	AN-103-2010	15	30	48	72	Primaveral	1
V16	AN-38 (Testigo)	16	38	60	66	Intermedio	2
V17	AN-105 (Testigo)	17	22	52	79	Intermedio	2
V18	AN-31P (Testigo)	18	39	51	65	Invernal	4
V19	AN-34 (Testigo)	19	21	54	78	Invernal	4
V20	AN-31 (Testigo)	20	28	41	76	Invernal	4

Cuadro 3.2. Manejo agronómico de los ambientes de evaluación.

Ambiente	Localidad	Fecha de siembra	Fertilización total	Número de riegos	Sistema de riego	Lámina total incluyendo precipitación (cm)	Clasificación
1	Zaragoza	13-12-2012	167-00-00	5	Gravedad	69.2	Sin estrés
2	Zaragoza	13-12-2012	167-00-00	4	Gravedad	57.2	Estrés moderado
3	Zaragoza	13-11-2012	237-00-00	6	Gravedad	79.2	Sin estrés (rebrote)
4	Navidad	05-06-2013	120-00-00	3	Aspersión	27.5	Estrés severo
5	Navidad	05-06-2013	00-00-00	3	Aspersión	27.5	Estrés Severo

Diseño experimental utilizado en campo

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento en cada uno de los ambientes.

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza individuales del rendimiento de grano de los tratamientos y de los grupos en el ambiente 1 (sin estrés) y el ambiente 5 (estrés severo) y de los índices de tolerancia a sequía generados a partir de los datos de rendimiento de los ambientes antes mencionados, bajo el siguiente modelo:

Modelo estadístico de los análisis de varianza individuales.

$$Y_{ij} = \mu + R_i + G_k + E_{ij}$$

donde:

i = repeticiones

k = tratamientos

donde:

Y_{ij} = Variable observada..

μ : = Efecto de la media general.

R_i = Efecto de la i-ésima repetición.

G_k = Efecto del k-ésimo tratamiento.

E_{ij} = Error experimental.

Comparación de medias

Se realizaron pruebas de comparación de medias para cada una de las variables estudiadas, utilizando la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (Steel y Torrie, 1992), con la siguiente fórmula:

$$T_o = q\alpha S\bar{x}$$

$$T_o = q\alpha \sqrt{\frac{S^2}{r}}$$

Donde:

$q\alpha$ = Valor tabular, que es un valor de t modificado

$S\bar{x}$ = error estándar

S^2 = Cuadrado medio del error

r = Número de repeticiones

Así mismo, se calculó el coeficiente de variación para cada una de las variables estudiadas con el fin de precisar la exactitud de la conducción del experimento, utilizando la siguiente fórmula:

$$C. V. = \frac{\sqrt{CMEE}}{X} \times 100$$

Donde:

CMEE = Cuadrado medio del error experimental.

X = Media general.

Finalmente, para investigar la relación entre el rendimiento y los índices de tolerancia a sequía se realizaron análisis de regresión simple entre las variables de interés.

Variables registradas

Variable de rendimiento:

- **Rendimiento de grano (RG):** en la etapa de madurez a cosecha, se cortó un metro lineal de un surco interno de cada parcela con competencia completa (0.30 m²), se trilló con una máquina estacionaria Pullman, se registró el peso en gramos y se transformó posteriormente a toneladas por hectárea (t ha⁻¹).

Índices de tolerancia a sequía:

- **Índice de susceptibilidad a la sequía (SSI)**

(Fischer y Maurer, 1978).

$$SSI = (1 - Y_d / Y_p) / D$$

Donde:

Y_d = Rendimiento de grano de los genotipos bajo sequía.

Y_p = Rendimiento de grano de los genotipos bajo riego.

D = Rendimiento promedio de grano de los genotipos bajo sequía /
Rendimiento promedio de grano de los genotipos bajo riego.

Valores menores a la unidad significan mayor tolerancia a la sequía.

Indice de tolerancia al estrés (STI)

(Fernandez, 1992)

$$\text{STI} = (Y_d) (Y_p) / Y_p^2$$

Valores mayores para STI indican mayor potencial de rendimiento bajo sequía.

➤ **Tolerancia (TOL)**

(Fernandez, 1992)

$$\text{TOL} = (Y_p - Y_d)$$

Valores mayores de TOL indican menor reducción del rendimiento bajo sequía (menor sensibilidad a la sequía).

➤ **Productividad media geométrica (GMP)**

(Fernandez, 1992)

$$\text{GMP} = \sqrt{(Y_d) (Y_p)}$$

➤ **Productividad media (MP)**

(Fernandez, 1992)

$$\text{MP} = (Y_d + Y_p) / 2$$

Valores mayores de MP indican mayor rendimiento en ambos ambientes (óptimo y estrés).

➤ **Índice de rendimiento (YI)**

(Gavuzzi et al. 1997).

$$YI = Y_d / \bar{Y}_d$$

Este índice clasifica los genotipos solo en base a sus rendimientos bajo estrés (no discrimina genotipos del grupo A).

➤ **Índice de estabilidad del rendimiento (YSI)**

(Bousslama y Schapaugh, 1984).

$$YSI = Y_d / Y_p$$

Valores mayores de YSI indican mayor estabilidad del genotipo.

Los análisis de varianza y las pruebas de comparación de medias de las variables estudiadas se realizaron con el paquete estadístico SAS 8.1 (1999). Los análisis de regresión entre variables y las gráficas fueron realizadas con el paquete estadístico Statistica 6.1 (2001).

IV. RESULTADOS

Resultados de los análisis de varianza entre tratamientos para las variables estudiadas.

En este estudio, los diferentes índices de tolerancia a sequía se calcularon en base a los rendimientos de grano de cada uno de los genotipos evaluados en los ambientes más contrastantes (ambiente 1, Zaragoza) y (ambiente 5, Navidad); lo anterior en base a la metodología y fórmulas propuestas por los autores de los diferentes índices.

Los resultados de los análisis de varianza se presentan en el Cuadro 4.1. En este se observa que se registraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos para todas las variables estudiadas, indicando la variabilidad entre genotipos con respecto a su respuesta de rendimiento al pasar de un ambiente óptimo a uno con déficit severo de humedad. Los coeficientes de variación, dependiendo de la variable, oscilaron entre 8.6 y 60.2%.

Resultados de las pruebas de comparación de medias entre tratamientos

Con respecto a las pruebas de comparación de medias entre tratamientos (Cuadro 4.2), se observa que en el caso del rendimiento en el ambiente 1 (condiciones óptimas), el genotipo 11 (primaveral), registró el rendimiento más alto (3.314 t ha^{-1}) y el genotipo con menor rendimiento fue el 7 (invernal), con 0.832 t ha^{-1} , rindiendo un 74.8% menos que el genotipo más rendidor. Por otro lado, en el ambiente 2 (condiciones desfavorables) el genotipo 8 (invernal), registró el menor rendimiento (0.053 t ha^{-1}) en comparación con el genotipo 10 (primaveral), que registró el rendimiento más alto en este ambiente (0.537 t ha^{-1}).

Asimismo, en el caso de los los índices de tolerancia a la sequía, se registraron los siguientes resultados: el índice de susceptibilidad a la sequía

(SSI), que considera que valores menores a la unidad indican mayor tolerancia, identificó al genotipo 10, de hábito primaveral, como el más tolerante, aunque fue estadísticamente igual a varios genotipos de ciclo precoz e intermedio (Cuadro 4.2). El mayor valor para este índice lo registró el genotipo 8, de hábito invernal, indicando su menor tolerancia a la sequía.

Para el índice tolerancia (TOL), que a mayor valor indica menor reducción del rendimiento bajo sequía, esto es, menor sensibilidad al estrés, el genotipo con el mayor valor fue el 11, de hábito primaveral, y el genotipo 7, de hábito invernal, mostró la mayor sensibilidad a la sequía.

Para el índice de tolerancia al estrés (STI), que identifica a los genotipos con mayor valor como los de mayor potencial de rendimiento bajo sequía, reportó al genotipo 17, de hábito intermedio, como el de mayor rendimiento, y nuevamente al genotipo 7, de hábito invernal, como el de menor potencial.

Por lo que respecta a los índices de productividad media geométrica (GMP) y productividad media (MP), que a mayor valor indican mayor rendimiento en ambos ambientes (óptimo y estrés), identificaron nuevamente a genotipos de hábito primaveral e intermedio (precozes) como los de mayor superioridad bajo este criterio (Cuadro 4.2).

Con respecto al índice de rendimiento (YI), que clasifica a los genotipos en base a sus rendimientos bajo estrés, el mayor valor lo registró el genotipo 10, de hábito primaveral, indicando su menor susceptibilidad a la sequía. Los menores valores los registraron los genotipos los genotipos de hábito invernal 7, 8 y 9, confirmando su mayor susceptibilidad a condiciones de estrés de sequía.

El índice de estabilidad del rendimiento (YSI), (Cuadro 4.2), que indica que a mayor valor existe mayor estabilidad del rendimiento, identificó al genotipo 10 de hábito primaveral, como el más estable. Los genotipos con

menor estabilidad fueron el 8 y el 9, de hábito invernal, indicando la respuesta diferencial de estos genotipos al crecer en ambientes muy contrastantes.

Resultados de los análisis de varianza entre grupos para las variables estudiadas.

Cuando se agruparon los genotipos de acuerdo a su hábito de crecimiento, se registraron los siguientes resultados:

Los análisis de varianza entre grupos para las variables de rendimiento e índices de tolerancia a sequía (Cuadro 4.3), registraron diferencias estadísticas entre los grupos (hábitos de crecimiento) para todas las variables, indicando la diversidad de respuestas de los genotipos al sembrarlos en condiciones contrastantes.

Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos.

Los resultados de las pruebas de comparación de medias (Cuadro 4.4), indicaron que para las variables de rendimiento, tanto en el ambiente óptimo como en el ambiente con estrés, los genotipos más precoces (G1 y G2), registraron los mayores rendimientos de grano; para el índice SSI, los tipos precoces resultaron los más tolerantes a la sequía, registrando los menores valores para este índice. En el caso de los índices TOL, STI, YI, YSI, GMP y MP, que en forma general, valores mayores indican una mayor tolerancia y estabilidad de los genotipos bajo condiciones de estrés, nuevamente los tipos precoces mostraron el mejor comportamiento bajo condiciones desfavorables.

Cuadro 4.1.- Cuadrados medios y significancia de los análisis de varianza entre tratamientos de las variables en estudio.

FV	GL	RGA1	RGA2	SSI	TOL	STI	YI	YSI	GMP	MP
REP	3	0.614 **	0.057 *	0.0090 *	0.356 ns	0.041 **	0.896 *	0.009 ns	0.199 **	0.246 **
TRAT	19	2.294 **	0.084 **	0.010 **	1.713 **	0.126 **	1.317 **	0.010 **	0.404 **	0.760 **
ERROR	57	0.123	0.016	0.0044	0.151	0.0054	0.260	0.0044	0.033	0.032
TOTAL	79									
CV %		15.8	50.9	8.6	19.8	14.6	50.9	60.2	25.3	14.6
MEDIA		2.214	0.253	0.774	1.961	0.603	1.001	0.111	0.717	1.233

ns=no significativo, * significativo al 5% y **altamente significativo al 1% de probabilidad, respectivamente

Cuadro 4.2.- Resultados de las pruebas de comparación de medias entre tratamientos de las variables en estudio.

TRAT	RGA1	RGA2	SSI	TOL	STI	YI	YSI	GMP	MP
1	2.579 abcd	0.230 abc	0.794 ab	2.348 abcde	0.573 abc	0.912abc	0.091 ab	0.720 bcdefg	1.404 abc
2	2.052 cdefg	0.326 abc	0.724 ab	1.725 defghi	0.485 cd	1.290 abc	0.160 ab	0.769 abcde	1.189 cd
3	2.214 bcdef	0.178 bc	0.806 ab	2.036 abcdefgh	0.488 cd	0.705 ac	0.079 ab	0.625 defgh	1.196 cd
4	2.102 cdefg	0.187 bc	0.799 ab	1.915 bcdefgh	0.467 cde	0.738 bc	0.086 ab	0.609 defgh	1.144 cde
5	2.452 abcd	0.237 abc	0.789 ab	2.215 abcdefg	0.548 bc	0.937 abc	0.090 ab	0.750 abcdef	1.344 bc
6	1.841 cdefg	0.188 bc	0.773 ab	1.653 efghi	0.414 cdef	0.745 bc	0.112 ab	0.576 defgh	1.015 cdef
7	0.832 i	0.062 c	0.809 ab	0.769 i	0.182 g	0.247 c	0.077 ab	0.224 h	0.447 g
8	1.455 efghi	0.053 c	0.849 a	1.401 fg	0.307 defg	0.211 c	0.036 b	0.278 fgh	0.754 defg
9	1.092 hi	0.058 c	0.830 a	1.034 hi	0.235 fg	0.229 c	0.055 b	0.247 gh	0.754 defg
10	2.356 bcde	0.537 a	0.639 b	1.819 cdefgh	0.590 abc	2.123 a	0.246 a	1.105 abc	0.575 fg
11	3.314 a	0.286 abc	0.800 ab	3.028 a	0.734 ab	1.131 abc	0.084 ab	0.968 abcd	1.800 ab
12	2.435 abcd	0.325 abc	0.752 ab	2.111 abcdefg	0.563 bc	1.284 abc	0.134 ab	0.882 abcd	1.380 bc
13	3.098 ab	0.339 abc	0.771 ab	2.759abc	0.701 ab	1.341 abc	0.114 ab	0.982 abcd	1.719 ab
14	2.703 abc	0.253 abc	0.793 ab	2.450 abcde	0.603 abc	1.001 abc	0.092 ab	0.821 abcd	1.478 abc
15	3.046 ab	0.366 abc	0.762 ab	2.680 abcd	0.696 ab	1.449 abc	0.123 ab	1.052 abcd	1.706 ab
16	3.082 ab	0.492 a	0.725 ab	2.590 abcde	0.729 ab	1.946 ab	0.160 ab	1.203 a	1.787 ab
17	3.287 a	0.437 ab	0.752 ab	2.850 a	0.760 a	1.728 ab	0.133 ab	1.195 ab	1.862 a
18	1.275 ghi	0.076 c	0.825 a	1.198 ghi	0.275 efg	0.302 c	0.060 b	0.311 efgh	0.675 efg
19	1.740 defghi	0.344 abc	0.673 ab	1.395 fg	0.425 cdef	1.363 abc	0.211 ab	0.708 cdefg	1.042 cdef
20	1.332 fg	0.085 c	0.819 a	1.246 ghi	0.289 efg	0.338 c	0.066 b	0.319 efgh	0.709 efg
DMS	0.925	0.339	0.175	1.021	0.193	1.340	0.175	0.477	0.474

Cuadro 4.3.- Cuadrados medios y significancia del análisis de varianza entre grupos de genotipos.

FV	GL	RGA1	RGA2	SSI	TOL	STI	YI	YSI	GMP	MP
REP	3	0.112 ns	0.015 *	0.0018 ns	0.0551 ns	0.0083 **	0.238 *	0.0018 ns	0.0480 **	0.0501 **
GRUPO	3	2.759 **	0.092 **	0.0031 *	1.859 **	0.1600 **	1.452 **	0.0031 *	0.5430 **	0.9607 **
ERROR	9	0.0310	0.0026	0.0007	0.0409	0.0011	0.0413	0.0007	0.0036	0.0066
TOTAL	15									
CV %		7.4	17.8	3.5	9.6	6.1	17.8	23.3	7.5	6.1
MEDIA		2.376	0.288	0.768	2.087	0.543	1.140	0.116	0.797	1.332

Cuadro 4.4. Resultados de las pruebas de comparación de medias entre grupos.

GRUPO	RGA1	RGA2	SSI	TOL	STI	YI	YSI	GMP	MP
1	2.826 a	0.351 a	0.753 ab	2.474 a	0.648 b	1.388 b	0.132 ab	0.969 b	1.588 b
2	3.185 a	0.465 a	0.739 b	2.720 a	0.744 a	1.837 a	0.146 a	1.199 a	1.824 a
3	2.207 b	0.224 b	0.781 ab	1.982 b	0.496 c	0.888 c	0.104 ab	0.675 c	1.216 c
4	1.287 c	0.113 b	0.801 a	1.174 c	0.286 d	0.448 c	0.084 b	0.348 d	0.700 d
DMS	0.388	0.113	0.060	0.446	0.073	0.448	0.060	0.133	0.179

DISCUSIÓN

Se observó una clara tendencia en la reducción de los valores de todas las características evaluadas al incrementarse las condiciones ambientales desfavorables, particularmente al aumentar los déficits de humedad, confirmando a los ambientes de Zaragoza como los de mayor potencial para la expresión de las diferentes características, en comparación con los ambientes de Navidad, que confirmaron ser los más desfavorables (Figura 4.1).

Lo anterior concuerda con lo señalado por Richards et al, (2002), que mencionan que en ambientes con condiciones de sequía severa, como fue el caso de Navidad, es un reto difícil para los mejoradores lograr incrementos en el rendimiento y por ende en sus componentes, mientras que en ambientes favorables las ganancias en rendimiento pueden ser mucho mayores. Aunque no se presentan datos de temperatura de los ambientes donde se realizaron las evaluaciones, estas fueron mayores al final del ciclo de cultivo, tanto en Navidad como en Zaragoza, y particularmente en esta última localidad. A este respecto, Wardlaw et al, (1989), mencionan que en ambientes mediterráneos similares a los de este estudio, el estrés por altas temperaturas es un importante factor después de la antesis.

En general, en este estudio, los valores máximos en promedio de los genotipos de las variables evaluadas se registraron en el ambiente 1 de Zaragoza, el cual no tuvo restricciones de humedad ni de fertilización, por lo que se le consideró como el ambiente óptimo en este estudio. El ambiente 5 de Navidad (déficit hídrico severo, sin fertilización), registró en promedio de los genotipos los valores más bajos en la mayoría de las variables, por lo cual se le consideró como el ambiente más desfavorable. Con respecto a la variable de rendimiento, esta registró los mayores porcentajes de reducción al pasar del ambiente óptimo al ambiente de estrés, confirmando la significativa diferencia entre los ambientes, ya que fue en promedio de los grupos de un 88 % (Figura 4.1);

cuando la reducción se consideró por grupo, la disminución fue proporcionalmente menor en los tipos precoces (85-87 %) y mayor en los grupos tardíos (89-91 %), concordando por lo señalado por Ehdaie y Shakiba (1996), que mencionan que el estrés por sequía durante el llenado de grano reduce dramáticamente el rendimiento de grano.

A este respecto, diversos autores reportan otras características que fueron posiblemente afectadas adversamente al aumentar el estrés ambiental, como son: aceleración del desarrollo de la planta y la subsecuente reducción en su tamaño (Midmore et al., 1984; Shpiler y Blum, 1986); incrementos en la respiración (Berry y Bjorkman, 1980); reducción en la fotosíntesis (Al-Katib y Paulsen, 1984; 1986; Reynolds et al, 2000); inhibición de la síntesis de almidón en los granos en desarrollo (Jenner, 1991); reducción en el número de espigas por planta, número de granos por espiga y menor peso de grano (Warrington et al, 1977), y aceleración de la senescencia en las plantas (Al-Katib y Paulsen, 1984).

Con respecto a los valores encontrados en cada uno de los grupos de genotipos de los índices de tolerancia a sequía evaluados en este estudio, en forma general, los genotipos más precoces registraron los mayores valores, resultados lógicos, ya que estos genotipos, por su precocidad, escapan a las condiciones de sequía terminal en comparación con los genotipos más tardíos, lo que les permitió tener un mayor rendimiento de grano, excepto para el índice SSI, el cual califica a los genotipos más tolerantes con los menores valores, que de todas formas en este estudio correspondió a los tipos más precoces.

Los resultados anteriores son muy importantes, ya que los genotipos con bajos valores de SS, o altos valores del resto de los índices utilizados, pueden ser seleccionados para condiciones de riego restringido presentes en diversas regiones agrícolas o como progenitores en programas de mejoramiento para tolerancia a sequía.

Sin embargo, los índices anteriores tienen diferentes niveles de precisión, dificultando la comparación entre genotipos. Por otra parte, cada índice debe de ser interpretado de acuerdo a su significado fisiológico y valor óptimo. Por ejemplo, un buen comportamiento de un genotipo tanto bajo condiciones de riego como de sequía lleva a valores altos de STI, MP, GMP YSI y YI; y generalmente, a valores bajos de TOL y SSI (Sio-Se Mardeh et al, 2006).

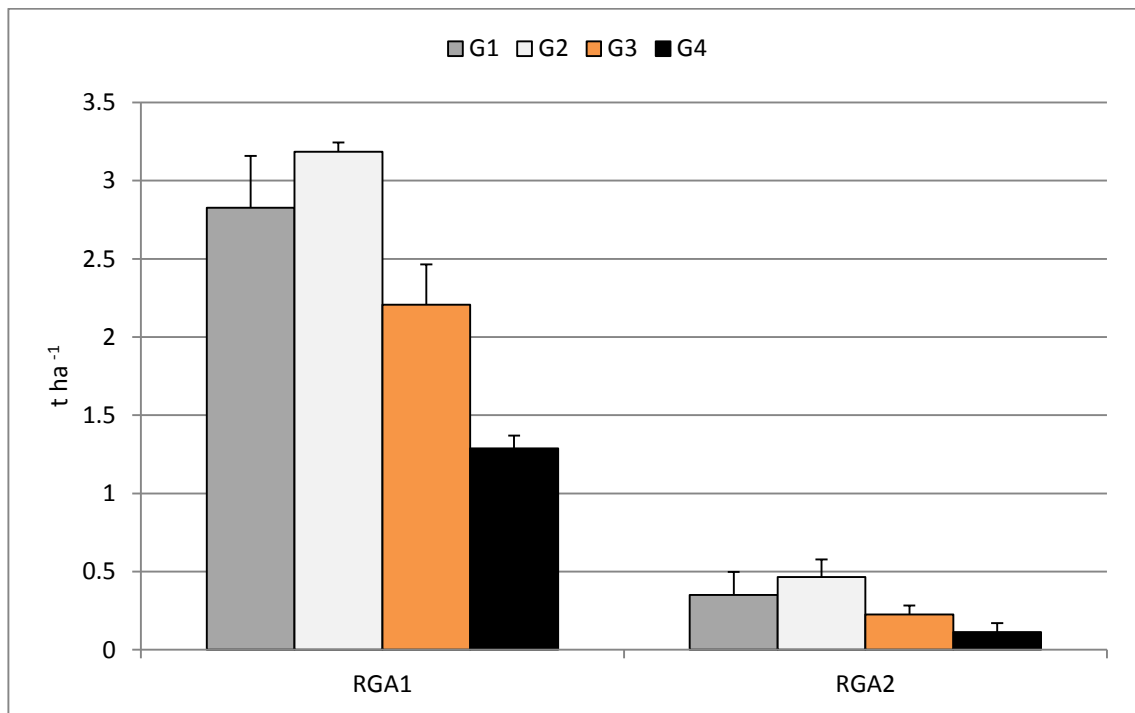


Figura 4.1. Representación gráfica del rendimiento de grano de los diferentes grupos de genotipos en el ambiente óptimo y en el de estrés de sequía.

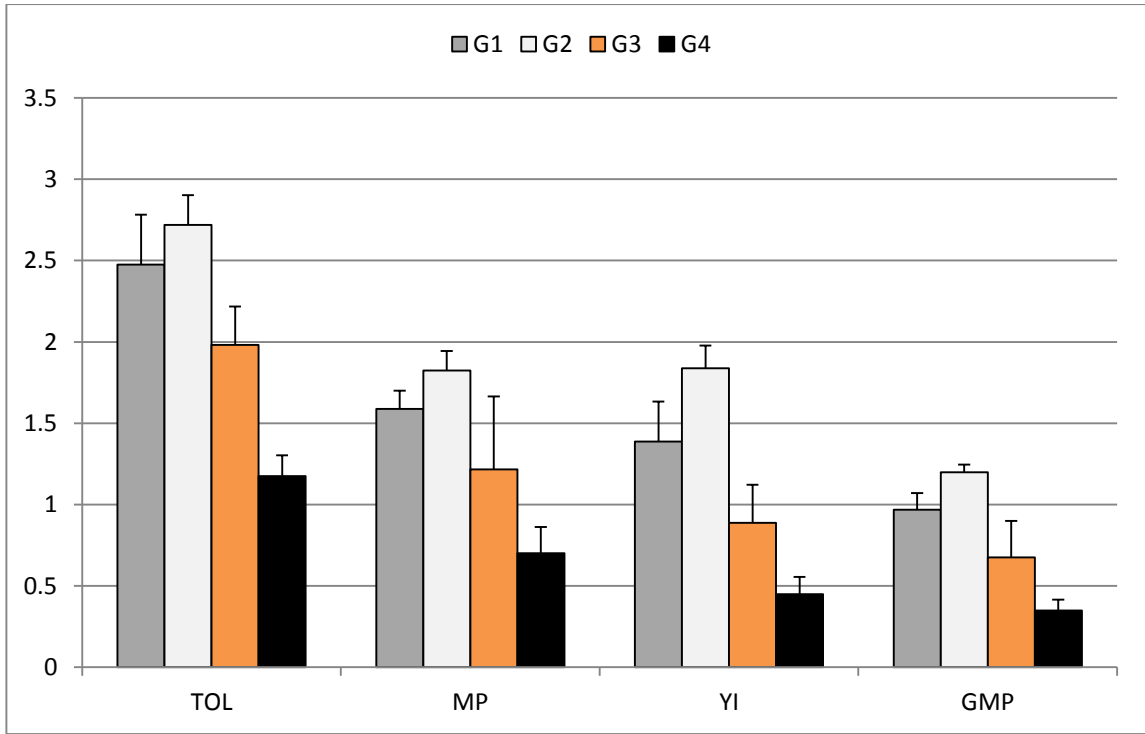


Figura 4.2. Representación gráfica de los valores por grupo de los diferentes índices de tolerancia a sequía utilizados en este estudio.

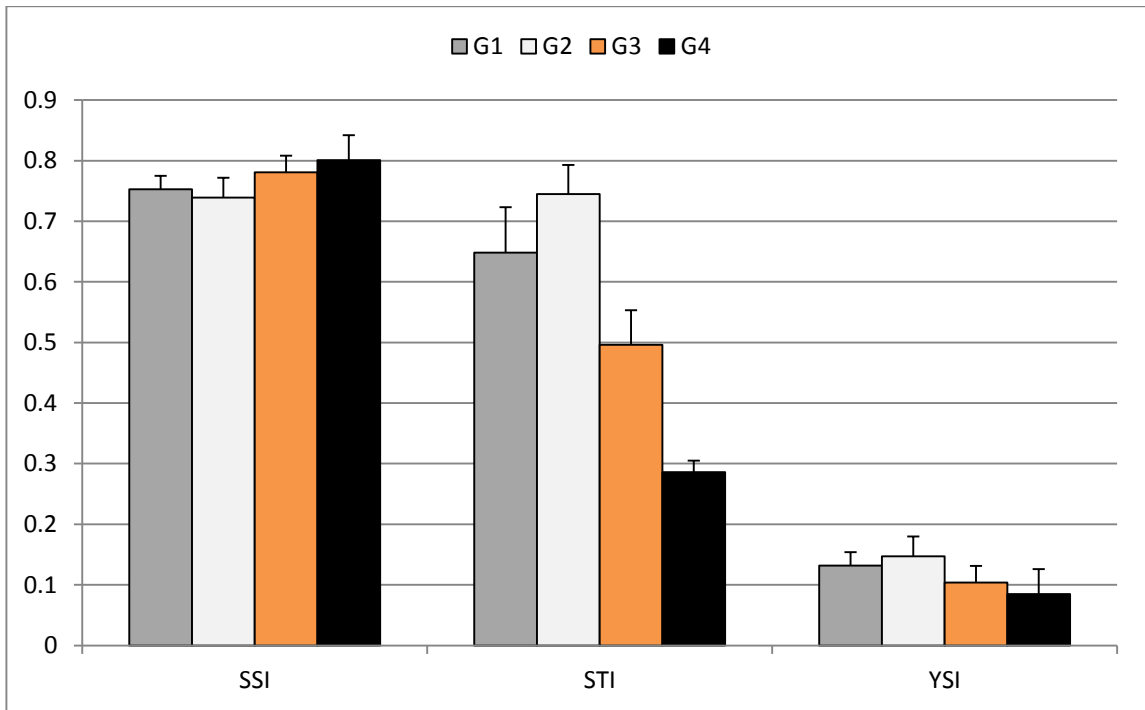


Figura 4.3. Representación gráfica de los valores por grupo de los diferentes índices de tolerancia a sequía utilizados en este estudio

V. CONCLUSIONES

En base a las condiciones bajo las cuales se realizó esta investigación, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los ambientes de estudio fueron significativamente contrastantes entre sí, particularmente con respecto a su régimen de humedad, lo que influyó en forma determinante en el comportamiento diferencial de los genotipos en todas las características evaluadas.
- Los genotipos de hábito de crecimiento primaveral e intermedio (precoces) registraron mayor tolerancia a condiciones de sequía que los genotipos tardíos (intermedio invernal e invernal), en base a su rendimiento de grano y el valor de los diferentes índices de tolerancia evaluados.
- El uso de los diferentes índices de tolerancia a sequía son herramientas útiles en la selección de genotipos con tolerancia a déficits de humedad en estudios con ambientes contrastantes de humedad, particularmente en las zonas áridas del norte y centro de México.

VI. LITERATURA CITADA

- Al-Katib, K., Paulsen, G.M., 1984. Mode of high temperatura injury to wheat during grain development. *Plant Physiol.* 61, 363-368.
- Ammar, K., Mergoum, M. Rajaram, S. 2004. The history and evolution of triticale. In: Mergoum, M. Mergoum H. (eds.): *Triticale Improvement and production*. FAO, 2-9.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P., Royo, C. 2002. Plant breeding and drought in C₃ cereals: what should we breed for? *Ann. Bot.* 89, 925-940.
- Bansal, K. C., and S. K. Sinha. 1991. Assessment of drought resistance in 20 accessions of *Triticum aestivum* and related species I. Total dry matter and grain yield stability. *Euphytica* 56: 7-14.
- Berry, J., Bjorkman, O. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Ann. Rev. Plan Physiol.* 31: 491-532.
- Betran, F.J., Beck, D., Banziger, M., Edmeades, G.O. 2003. Genetic analysis of inbred and hybrid grain yield under stress and nonstress environments in tropical maize. *Crop Sci.* 43: 807-817.
- Blum, A.. 1986. The effect of heat stress on wheat leaf and ear photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 37 (174), 111-118.
- Bousslama, M., Schapaugh, W.T.1984. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Sci.* 24: 933-937.

- Bruckner, L. P., and R. C. Froberg. 1987. Stress tolerance and adaptation in spring wheat. *Crop Sci.*27: 31-36.
- Byrne, P.F., Bolaños, J., Edmeades, G.O., Eaton, D.L. 1995. Gains from selection under drought versus multilocation testing in related tropical maize populations. *Crop Sci.* 35: 63-69.
- Ceccarelli, S. 1987. Yield potential and drought tolerance of segregating populations of barley in contrasting environments. *Euphytica* 40: 197-205.
- Ceccarelli, S., Grando, S. 1991. Selection environment and environmental sensitivity in barley. *Euphytica* 57: 157-167.
- Cedola, M.C., A. Iannucci, G. Scalfati, M. Soprano, and A. Rascio. 1994. Leaf morpho-physiological parameters as screening techniques for drought stress tolerance in *Triticum durum* Desf. *J. Genet. Breed.* 48: 229-236.
- Clarke, J. M., T. F. Townley-Smith, T. N. McCaig and D. G. Green. 1984. Growth analysis of spring wheat cultivars of varying drought resistance. *Crop Sci.* 24: 537-541.
- Clarke, J.M., De Pauw, R. M., Townley-Smith, T.M. 1992. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Sci.* 32: 728-732.
- Clarke, J.M., Townley-Smith, T.M., McCaig, T.N., Green, D.G. 1984. Growth analysis of spring wheat cultivars of varying drought resistance. *Crop Sci.* 24: 537-541.
- Ehdaie, B. and E.A. Hall. 1988. Differential responses of landraces and improved spring wheat genotypes to stress environment. *Crop Sci.* 28: 838-842.

- Ehdaie, B., and G. J. Waines. 1988. Yield potential and stress susceptibility of durum landraces in non-stress and stress environment. 7th Int. Wheat Genet. Symp. 2: 811-815.
- Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing stress tolerance. In: Kuo C.G. (Ed), Proceedings of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and Other Food Crops in Temperature and Water Stress Publication, Tainan, Taiwan.
- Fischer, R. A., and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Aust. J. Agric. Res. 29: 897-912.
- Fischer, R. A., and T. J. Wood. 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars. III. Yield association with morphological traits. Aust. J. Agric. Res. 30: 1001-1020.
- Fox, P.N., Skovmand, B., Thompson, B.K., Braun, H.J., Cormier, R. 1990. Yield and adaptation of hexaploid spring triticale. Euphytica 47: 57-64.
- Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campalino, R.G., Ricciardi, G.L., Borghi, B. 1997. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in Winter cereals. Plant Sci. 77:523-531.
- Golabadi, M., A. Arzani, S.A.M. Maibody. 2006. Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. Afr. J. Agric. Res. 5: 162-171.
- Hall, A.E., 1993. Is dehydration tolerance relevant to genotypic differences in leaf senescence and crop adaptation to dry environments? In: T.J. Close and Bray, E.A., (Eds.), Plant responses to cellular dehydration during environmental stress. Pp. 1-10.

- Hohls, T. 2001. Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica* 120: 235-245.
- Hossain, A.B.S., Sears, A.G., Cox, T.S., Paulsen, G.M. 1990. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Sci.* 30: 622-627.
- Huang, B. 2000. Role of root morphological and physiological characteristics in drought resistance of plants. In: Wilkinson, R.E. (Ed.), *Plant Environment interactions*. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 36-64.
- Inoue, T., Inanaga, S., Y. Sugimoto, An, P. Eneji, A. E. 2004. Effect of drought on ear and flag leaf photosynthesis of two wheat cultivars differing in drought resistance. *Photosynthetica* 42: 559-565.
- Jenner, C.F., 1991. Effects of exposure of wheat ears to high temperature on dry matter accumulation and carbohydrate metabolism in the grain of two cultivars. I. Immediate responses. *Aust. J. Plant Physiol.* 18: 165-177.
- Larsson, S., and A. G. Gorny. 1988. Grain yield and drought resistance indices of oat cultivars in field rain shelter and laboratory experiments. *J. Agron. Crop Sci.* 161: 277-286.
- Lazar, M. D., C. D. Salisbury, and W. D. Worrall. 1995. Variation in drought susceptibility among closely related wheat lines. *Field Crops Res.* 41: 147-156.

- Lelley, T. 2006. Triticale: A low-input cereal with untapped potential. In: Singh, R. J. Jauhar, P.P (eds.) Genetic Resources Chromosome Engineering and Crop Improvement. Vol.2: Cereals. Boca Raton (FL): CRC Press, Taylor Francis Group, FL. Pp. 395-430.
- Lonbani, M y A. Arzani. 2011. Morpho-physiological traits associated with terminal drought stress tolerance in triticale and wheat. *Agronomy Research*. 9 (1-2): 315-329.
- Lozano del Río, A, J. 2002. Triticales forrajeros para la Región Lagunera. *Revista Agropecuaria Laguna*. 29(6):4-5.
- McCaig, T.N., Clarke, J.M. 1982. Seasonal changes in nonstructural carbohydrate levels of wheat and oats grown in semiarid environment. *Crop Sci*. 22: 963-970.
- Midmore, D.J., Cartwright, P.M., Fischer, R.A., 1984. Wheat in tropical environments. II. Growth and grain yield. *Field Crops Res*. 8: 207-227.
- Mitra, J., 2001. Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Curr. Sci*. 80: 758-762.
- Nasir Ud-Din, Carver, B.F., Clutte, A.C. 1992. Genetic analysis and selection for wheat yield in drought-stressed and irrigated environments. *Euphytica* 62: 89-96.
- Ozkan, H., I. Genc, T. Yagbasanlar, and F. Toklu. 1999. Stress tolerance in hexaploid spring triticale under Mediterranean environment. *Plant Breed*. 118: 365-367.

- Ozkan, H., T. Yagbasanlar, and I. Genc. 1998. Tolerance and stability studies on durum wheat under drought and heat stress conditions. *Cereal Res. Comm.* 26: 405-412.
- Rajaram, S., Van Ginkel, M. 2001. Mexico, 50 years of international wheat breeding. In: Bonjean, A.P., Angus, W.J. (Eds.), *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding*. Lavoisier Publishing, Paris, France, pp. 579-604.
- Rathjen, A. J. 1994. The biological basis of genotype x environment interaction: its definition and management. In: *Proceedings of the Seventh Assembly of the Wheat Breeding Society of Australia*, Adelaide, Australia.
- Reynolds, M.P., Delgado, M.I., Gutierrez-Rodriguez, B.M., Larqué-Saavedra, A. 2000. Photosynthesis of wheat in a warm, irrigated environment. I. Genetic diversity and crop productivity. *Field Crops Res.* 66: 37-50.
- Richards, R.A., G. J. Rebetzke, A.G. Condon, and A. F. Herwaarden. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Sci.* 42: 111-121.
- Rosielle, A.A., J. Hamblin, 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Sci.* 21: 943-946.
- Royo, C., Soler, C., Romagosa, I. 1995. Agronomical and morphological differentiation among winter and spring triticales. *Plant Breeding* 114: 413-416.
- SAS Institute Inc. 1999. *User's Guide. Statistics, Version 8.1. Sixth edition.* SAS Inc. Cary, North Carolina, USA.

Statistica. 2001. By Statsoft Inc. U.S. A. Versión 6.1.

Shakhatreh, Y., O. Kafawin, S. Ceccarelli, and H. Saoub. 2001. Selection of barley lines for drought tolerance in low-rainfall areas. *J. Agron. Crop Sci.* 186: 119-127.

Shpiler, L., and A. Blum. 1986. Differential reaction of wheat cultivars to hot environments. *Euphytica.* 35: 483-492.

Sio-Se Mardeh, A., A. Ahmadi., K. Poustini., V. Mohammadi. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research.* 98: 222-229.

Van Ginkel, M., Calhoun, D.S., Gebeyehu, G., Miranda, A., Tian-you, C., Pargas Lara, R., Trethowan, R. M., Sayre, K., Crossa, L., Rajaram, S. 1998. Plant traits related to yield of wheat in early, late, or continuous drought conditions. *Euphytica* 100: 109-121.

Varughese, G. 1996. *Triticale: present status and challenges and tomorrow.* Kluwer Academic, Deventer, The Netherlands, pp. 13-20.

Voltas, J., Lopez-Corcoles, H., Borrás, G., 2005. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multi-environment trials. *Eur. J. Agron.* 22: 309-324.

Wardlaw, I.F., Dawson, A., Munibi, P. 1989. The tolerance of wheat to high temperature during reproductive growth. II. Grain development. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 15-24.

Warrington, I.J., Dunstone, R.L., Green, L.M. 1977. Temperature effects at three development stages on yield of the wheat ear. *Aust. J. Agric. Res.* 28: 11-27.