

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN MEJORAMIENTO GENÉTICO**

**DE PLANTAS**



**“IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE TOLERANCIA A  
ESTRÉS HÍDRICO EN TRIGO HARINERO (*Triticum  
aestivum* L.) BAJO CONDICIONES LA MOLINA, LIMA”**

**Presentada por:**

**ANA GABRIELA AMADO ARGÜELLES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN MEJORAMIENTO GENÉTICO  
DE PLANTAS**

**Lima – Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN MEJORAMIENTO GENÉTICO DE  
PLANTAS**

**“IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE TOLERANCIA A  
ESTRÉS HÍDRICO EN TRIGO HARINERO (*Triticum  
aestivum* L.) BAJO CONDICIONES LA MOLINA - LIMA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**ANA GABRIELA AMADO ARGÜELLES**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Mg.Sc. ~~Ricardo~~ Sevilla Panizo  
**PRESIDENTE**

Dra. Luz Gómez Pando  
**ASESOR**

Dr. Raúl Blas Sevillano  
**MIEMBRO**

Ph.D. Hugo Soplín Villacorta  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

- A Dios por iluminar mi camino cada día.

- A mis padres Isabel y Oscar, y hermanas Isabel y Cecilia por acompañarme en este proyecto de mi vida académica.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A la Prof. Luz Gómez Pando por su abnegada labor como investigadora en la Universidad Nacional Agraria La Molina, compartiendo su gran sabiduría y confianza para el desarrollo del presente trabajo.
- Al Ing. Raymundo Gutiérrez y a la Blga. Ana Eguiluz por su orientación y apoyo en el desarrollo del presente trabajo, y a los miembros del jurado por su revisión y consejos.
- A la Secretaria Técnica de Cooperación del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (STC-CGIAR) por el financiamiento parcial a través del Proyecto: “Mejora en los sistemas productivos de papa y trigo a través de variedades con tolerancia a la sequía y alta eficiencia en el uso de agua, como adaptación al cambio climático en el Perú”. Ejecutados por el CIP en convenio con la UNALM/Programa de Cereales y Granos Nativos.

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 IMPORTANCIA DEL TRIGO .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 EL ESTRÉS DE SEQUÍA, SU EFECTO EN LAS PLANTAS Y         MECANISMOS DE PROTECCIÓN DE LA PLANTA CONTRA EL         ESTRÉS DE SEQUÍA .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Efecto del estrés hídrico en el contenido relativo de agua.....	8
2.2.2 Efecto del estrés hídrico en la eficiencia de uso agua.....	8
2.2.3 Efecto del estrés hídrico en la fotosíntesis y el contenido de clorofila .....	9
2.2.4 Efecto del estrés hídrico en el contenido de prolina.....	10
2.2.5 Efecto del estrés hídrico en el contenido de proteína de grano.....	11
<b>2.3 MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA DESARROLLAR TOLERANCIA         AL ESTRÉS DE SEQUÍA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL RENDIMIENTO POTENCIAL         DEL CULTIVO .....</b>	<b>15</b>
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 MATERIAL BIOLÓGICO .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
3.2.1 Instalación del experimento .....	18
3.2.2 Metodología operacional .....	22
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN         CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS, FISIOLÓGICAS Y         BIOQUÍMICAS .....</b>	<b>30</b>
4.1.1 Características agronómicas .....	30
4.1.2 Características fisiológicas .....	38
4.1.3 Características bioquímicas .....	46
<b>4.2 IDENTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS         CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS, FISIOLÓGICAS Y         BIOQUÍMICAS .....</b>	<b>48</b>

<b>4.3 DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE TRIGO PARA MEJORAMIENTO DE VARIEDADES CON TOLERANCIA A LA SEQUÍA.....</b>	<b>52</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de caracterización del suelo empleado en el experimento de déficit hídrico de 15 líneas avanzadas de trigo. La Molina – Lima.....	21
Tabla 2. Análisis de agua de riego empleada el experimento de déficit hídrico de 15 líneas avanzadas de trigo. La Molina - Lima.....	21
Tabla 3. Cuadrados Medios del análisis de varianza y significancia de días a la antesis, días a la madurez, llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha de tres genotipos de trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina.....	32
Tabla 4. Cuadrados Medios del análisis de varianza y significancia de rendimiento y componentes de rendimiento de tres genotipos de trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina. ....	32
Tabla 5. Promedios y prueba de significación Tukey ( $p<0.05$ ) de días a la antesis, días a la madurez, llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha de tres genotipos de trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina...	33
Tabla 6. Promedios y prueba de significación Tukey ( $p<0.05$ ) de rendimiento, número de espigas/planta, numero de granos/planta, peso de 100 granos (g) de tres genotipos de trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina. ....	33
Tabla 7. Cuadrados medios del ANVA de tres evaluaciones de fotosíntesis de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	39
Tabla 8. Promedios de fotosíntesis y Prueba de Significación Tukey ( $p<0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) al inicio del espigado, a los 14 días del espigado y a los 33 días después del espigado en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	39
Tabla 9. Cuadrados medios del ANVA de tres evaluaciones de clorofila de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina....	41
Tabla 10. Promedios de clorofila y Prueba de Significación Tukey ( $p<0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) al inicio del espigado, a los 10 días del espigado y a los 20 días después del espigado en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	41
Tabla 11. Cuadrados medios del ANVA de agua transpirada desde espigado y eficiencia de uso de agua de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.....	43

Tabla 12. Promedios de agua transpirada desde espigado (ml) y eficiencia de uso de agua (g/L) y Prueba de Significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	43
Tabla 13. Cuadrados medios del ANVA del contenido relativo de agua (CRA) de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	45
Tabla 14. Promedios del contenido relativo de agua (CRA) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.....	45
Tabla 15. Cuadrados medios del ANVA del contenido proteína de grano de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina...	46
Tabla 16. Promedios del contenido de proteína (%) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.....	47
Tabla 17. Cuadrados medios del ANVA del contenido prolina de tres genotipos de trigo harinero ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina. ....	47
Tabla 18. Promedios del contenido de prolina ( $\mu\text{mol/g}$ ) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.....	48
Tabla 19. Coeficientes de correlación entre características agronómicas determinadas para tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.....	49
Tabla 20. Coeficientes de correlación de características fisiológicas y bioquímicas con las características agronómicas determinadas para tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) bajo ambiente de riego limitado en condiciones de La Molina. ....	50
Tabla 21. Coeficientes de correlación de características fisiológicas y bioquímicas con las características agronómicas para tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) bajo ambiente de riego óptimo en condiciones de La Molina. ....	51
Tabla 22. Producción media (MP), producción geométrica media (GMP) e índices obtenidos en tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.....	53
Tabla 23. Eficiencia de la tolerancia a la sequía e índice de estabilidad del rendimiento (YSI) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Registro meteorológico de la temperatura en casa malla - tinglado durante la fase experimental. La Molina – Lima. ....	19
Figura 2. Humedad relativa registrada en el tinglado durante la fase experimental. La Molina Lima. ....	20
Figura 3. Macetas en casa de malla antiáfida del tinglado. ....	28
Figura 4. Distribución de unidades experimentales.....	29

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Determinación de la Prolina libre acumulada bajo condiciones de estrés Protocolo para determinación de prolina (Prof. Blgo. Abelardo Calderón Rodríguez, MSc)..	71
Anexo 2: Tabla de correlación de Pearson entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina. ....	72
Anexo 3: Tabla de p-value de correlación entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.....	73
Anexo 4: Tabla de coeficiente de correlación de Pearson y p-value del coeficiente de correlación de el rendimiento óptimo ( $Y_p$ ), rendimiento bajo riego limitado ( $Y_s$ ) y los indicadores (MP, GMP, STI, TOL, SSI, MSI) de tres genotipos de trigo ( <i>T. aestivum</i> L.) bajo condiciones de La Molina.....	74
Anexo 5: Pasos para obtener el MSI a través de puntuaciones asignadas a los indicadores de tolerancia al estrés hídrico (Mohammadi 2019). ....	75

## RESUMEN

El trigo (*Triticum aestivum s sp aestivum*) es un alimento básico de la población peruana y su producción se realiza en la región andina en condiciones marginales y con problemas de sequías frecuentes. El desarrollo de variedades mejoradas con mayor tolerancia a la sequía es una alternativa importante para mejorar los rendimientos del cultivo de trigo. La presente investigación tuvo como objetivo principal contribuir al desarrollo de líneas con mayor tolerancia al estrés hídrico. Se emplearon tres genotipos de trigo cultivados en macetas y se evaluó el efecto del estrés hídrico moderado en la fase de espigado y llenado de grano en condiciones controladas. Se evaluaron características agronómicas (rendimiento de grano, días a la antesis, días a la madurez, días entre antesis y madurez, altura de planta, biomasa, índice de cosecha, número de espigas, número de granos, peso de 100 granos), fisiológicas (fotosíntesis, clorofila, agua transpirada, eficiencia de uso de agua (EUA), contenido relativo de agua (CRA) y bioquímicas (contenido de proteína, contenido de prolina), e indicadores de selección como son el índice de tolerancia a la sequía (STI), tolerancia (TOL), índice de susceptibilidad a la sequía (SSI), el índice de puntuación múltiple (MSI), la eficiencia de tolerancia a la sequía (DTE) y el índice de estabilidad del rendimiento (YSI). Se empleó el diseño estadístico completamente al azar, los datos fueron analizados y se usaron las pruebas de Tukey, t-Student y correlación de Pearson. Los resultados obtenidos de las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas determinaron que los genotipos bajo condiciones de estrés hídrico moderado PITH-23 LM08B (G1) y EARTH5-107 VM08 (G2) tuvieron el mayor rendimiento con 1.64g por planta., EARTH5-107 VM08 (G2) tuvo el mayor número de días de llenado de grano y mayor transpiración desde espigado con 32 días y 239 mL por planta, respectivamente; y PITH-23 LM08B (G1) y EARTH5-107 VM08 (G2) tuvieron el menor contenido de prolina con 13.7 y 2.3  $\mu\text{mol/g}$ . Se observó una correlación fuerte positiva entre el rendimiento y la biomasa ( $r=0.82$ ,  $p<0.01$ ). A través del índice de puntuación múltiple (MSI) se determinó que el genotipo EARTH5-107 VM08 (G2) con MSI de 4.2 fue el de mejor tolerancia al estrés hídrico recomendándose su empleo en programas de mejoramiento.

**Palabras clave:** trigo, características agronómicas, indicadores de tolerancia, sequía.

## ABSTRACT

Wheat (*Triticum aestivum s sp aestivum*) is a staple food of the Peruvian population and its production is carried out in the Andean region under marginal conditions and with frequent drought problems. The development of improved varieties with greater tolerance to drought is an important alternative to improve wheat crop yields. The main objective of this research was to contribute to the development of lines with greater tolerance to water stress. Three wheat genotypes grown in pots were used and the effect of moderate water stress in the heading and grain-filling phase was evaluated under controlled conditions. Agronomic characteristics (grain yield, days to anthesis, days to maturity, days between anthesis and maturity, plant height, biomass, harvest index, number of spikes, number of grains, weight of 100 grains), physiological characteristics (photosynthesis, chlorophyll, transpired water, water use efficiency (WUE), relative water content (RWC)) and biochemicals (protein content, proline content), and selection indicators such as the drought tolerance index (STI), Tolerance (TOL), Drought Susceptibility Index (SSI), Multiple Score Index (MSI), Drought Tolerance Efficiency (DTE), and Yield Stability Index (YSI) were evaluated. The statistical design was used completely at random, the data were analyzed and the Tukey test, t-student test and Pearson's correlation were used. The results obtained from the agronomic, physiological and biochemical characteristics determined that the genotypes under conditions of moderate water stress PITH-23 LM08B (G1) and EARTH5-107 VM08 (G2) had the highest yield with 1.64g per plant. EARTH5-107 VM08 (G2) had the highest number of grain filling days and the highest transpiration from earing with 32 days and 239 mL per plant, respectively; and PITH-23 LM08B (G1) and EARTH5-107 VM08 (G2) had the lowest proline content with 13.7 and 2.3  $\mu\text{mol/g}$ . It was observed a strong positive correlation between yield and biomass ( $r = 0.82$ ,  $p < 0.01$ ). Through the multiple scoring index (MSI), the EARTH5-107 VM08 (G2) genotype with an MSI of 4.2 it was one with the best tolerance to water stress, recommended for use in breeding programs.

**Keywords:** wheat, agronomic characteristics, tolerance indicators, drought.

## I. INTRODUCCIÓN

Las plantas son la base de la cadena alimenticia, y el principal componente en la alimentación humana. Dentro de los vegetales, destacan los cereales que contribuyen con alrededor del 50% de las calorías y proteínas a la alimentación mundial. Entre ellos está el trigo, que es uno de los cereales más importantes al considerarse uno de los primeros en superficie y producción a nivel mundial. Las revisiones preliminares de la FAO (2020) sobre la producción de trigo en 2020 ascienden a 763 millones de toneladas (<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>).

En el Perú el trigo es un cultivo básico en la alimentación de la población peruana, cubriendo su demanda en el año 2018 en un 8.6% con producción nacional (194,600 toneladas) y 91.4% con trigo importado (2'069,037 toneladas) (MINAGRI 2019). En el año 2018 se tuvo una superficie cosechada de aproximadamente 126,638 ha, con una producción de 195,088 t y un rendimiento de 1.541 t/ha (MINAGRI 2020). Este rendimiento es relativamente bajo y se debe a que el cultivo de trigo, en el Perú, se realiza mayormente en la Sierra en condiciones de suelo y clima adversos con baja tecnología.

El cambio climático debido al calentamiento global por efecto de los gases invernadero y otros factores originan condiciones adversas para los cultivos como sequías, lluvias torrenciales, inundaciones, temperaturas extremas. Estas condiciones adversas afectan la productividad de los cultivos, y de seguir esta tendencia puede comprometer la seguridad alimenticia del mundo.

Según Alegría (2009), en las cuencas hidrográficas de la Costa, del Centro y Sur, y Sierra del Perú, vertientes del Pacífico y cuencas endorreicas del lago Titicaca, existe un mayor déficit en el balance hídrico y una tendencia a la disminución de la precipitación. En estas zonas, la reducción de la oferta hídrica se agrava por el incremento de la temperatura, la disminución de la capacidad de infiltración del agua en el suelo y la capacidad retentiva de

agua en las cabeceras de cuenca, causados por procesos de deforestación, sobrepastoreo, quema de cobertura vegetal y la reducción o deterioro del área de páramos, humedales o zonas de recarga de acuíferos entre otros factores, que contribuyen en el cambio de condiciones para los cultivos.

Para disminuir la dependencia nacional de trigo importado y para asegurar la fuente de alimentos y economía de los agricultores de la sierra es muy importante desarrollar variedades con mayor tolerancia a los estreses abióticos como el déficit hídrico causado por la sequía. Existen diversas líneas avanzadas de trigo en los programas de mejoramiento que requieren ser evaluadas en condiciones de estrés para determinar su grado de tolerancia. Este trabajo de investigación está orientado a identificar el grado de tolerancia al déficit hídrico de tres líneas avanzadas de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero” bajo condiciones de riego controlado, en las etapas llenado de grano y maduración de grano; etapas en las cuales el trigo es muy sensible a la falta de agua.

Dentro de los indicadores usados para determinar la tolerancia a la sequía están las características agronómicas como el rendimiento, que se relaciona con análisis de mecanismos fisiológicos y químicos de la planta sometida al déficit hídrico (Fischer y Turner 1978).

## **HIPÓTESIS**

Se conoce que el déficit hídrico en las fases de espigado y madurez de grano causa cambios en las características morfológicas, agronómicas y fisiológicas afectando el potencial de rendimiento del trigo de acuerdo al grado de tolerancia de tres genotipos o líneas avanzadas, por tanto se generan las hipótesis:

Ho: Los genotipos o líneas avanzadas bajo un régimen de riego limitado mostrarán diferencias en rendimiento debido a su tolerancia al estrés hídrico respecto a los sometidos a riego normal u óptimo.

Ha: Los genotipos o líneas avanzadas bajo un régimen de riego limitado no mostrarán diferencias en rendimiento debido a su tolerancia al estrés hídrico respecto a los sometidos a riego normal u óptimo.

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General:

- Contribuir al desarrollo de variedades con tolerancia a la sequía de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero” para una producción sostenible del cultivo en condiciones marginales.

Objetivos Específicos:

- Evaluar el efecto del estrés por déficit hídrico en características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero”.
- Determinar la relación entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero” sometidos a estrés hídrico.
- Determinar indicadores de selección de genotipos de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero” para mejoramiento de variedades con tolerancia a la sequía.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 IMPORTANCIA DEL TRIGO**

Los cereales estuvieron entre los primeros cultivos sembrados por el hombre. En el Cercano Oriente hace alrededor de diez mil años se empleaban semillas de trigo, cebada, lenteja y guisantes en la alimentación, evidenciando la recolección preferencial y del desarrollo de la agricultura. Es así que el trigo es un cultivo que forma parte de la alimentación del hombre desde tiempos muy remotos y continúa siendo parte del desarrollo económico y cultural de la humanidad. Se siembra en más de 200 millones de has, siendo el cultivo alimenticio con mayor superficie a nivel mundial

El trigo es importante por ser uno de los cultivos más empleados en la alimentación mundial. Es fuente de calorías, proteínas, minerales y vitaminas. El contenido de proteína del trigo cultivado comercialmente varía en rango de 6–16%, y estas proteínas pueden satisfacer los requerimientos de aminoácidos de un hombre adulto. El grano de trigo como la harina proveniente del mismo se emplean en la elaboración de pan, galletas, fideos, hojuelas, entre otros productos presentes en la mesa de las familias peruanas. También el trigo es materia prima para la producción de etanol por su cantidad de almidón (Simmonds 1981).

El 97% de la superficie cultivada de trigo en el Perú se encuentra ubicada en la sierra y el 3% en la costa, y del área sembrada en el país entre el 82 y 90% se realiza bajo condiciones de secano o sin irrigación, dependiendo exclusivamente de las lluvias, con frecuencias muy irregulares (MINAGRI 2013, INEI 2013). Los departamentos de mayor área sembrada son: La Libertad, Cajamarca, Ancash, Piura, Ayacucho y Cusco (MINAGRI 2020).

En el Perú el trigo es un alimento consumido diariamente por la población peruana por lo que se considera un alimento básico. La demanda nacional se cubre mayormente con

importaciones, creando una dependencia alimentaria del exterior la cual debe de reducirse en lo posible; incrementando la productividad y la producción nacional.

## **2.2 EL ESTRÉS DE SEQUÍA, SU EFECTO EN LAS PLANTAS Y MECANISMOS DE PROTECCIÓN DE LA PLANTA CONTRA EL ESTRÉS DE SEQUÍA**

El agua es uno de los elementos esenciales para los organismos vivos. En plantas, la transpiración de agua es útil para prevenir aumentos de temperaturas que pueden dañar el cultivo. En grasas particularmente más del 90% del agua absorbida es eliminada en condiciones de alta temperatura.

Blum (1988) señala que el estrés hídrico se presenta cuando la demanda de agua es mayor al suministro. Acevedo *et al.* (2002) indican que el estrés se produce cuando la absorción de agua por un cultivo es más baja que la demanda evaporativa de la atmósfera.

Los daños mayores ocasionados por el estrés se producen en la fase crítica que comprende el periodo entre las fases fenológicas del encañado (Z31) (Zadoks *et al.* 1974) hasta la antesis (Z 65), es el periodo en donde se ubica gran parte de la etapa crítica del cultivo de trigo (20 días antes y 10 días después de antesis) debido a que en este periodo se determina el rendimiento potencial de los granos (Reynolds *et al.* 2012). Es en estas fases donde se determina los componentes de rendimiento: el número final de espigas por planta, el número de espiguillas y flores por espiguilla que darán lugar a los granos. La ocurrencia de cualquier factor de estrés en este período, entre ellos el estrés hídrico, resulta irreversible, afectando el rendimiento final de grano de trigo (De San Celedonio *et al.* 2014, Marti *et al.* 2015). La respuesta de los genotipos al estrés hídrico antes del espigado es variable (Castro *et al.* 2011, De San Celedonio *et al.* 2014).

Nonami (1998) señala que el estrés hídrico causa una disminución del alargamiento celular y del crecimiento de ápices y raíces. A la inhibición de la expansión celular, le sigue una reducción en la síntesis de pared celular, la síntesis proteica, reducción de la fotosíntesis (cierre de estomas) y disminución del rendimiento. El crecimiento de las plantas se reduce muy fuertemente en condiciones de estrés hídrico o sequía (Yeo *et al.* 1991, Pérez-Alfocea *et al.* 1993). El estrés hídrico afecta la turgencia de las células originando posteriormente la

marchitez. El efecto del déficit hídrico depende del período de desarrollo en que ocurre. Déficit ligeros de agua en el período vegetativo tienen poco efecto sobre el crecimiento del cultivo, pudiendo acelerar la maduración. El período de floración es muy sensible al déficit de agua, pues afecta la formación del polen y la fertilización. El número de granos puede disminuir bruscamente cuando el estrés ocurre en el período de crecimiento de la espiga y antes de la antesis (Hochman 1982).

Fischer y Turner (1978) informan de diversos mecanismos de adaptación morfológicos, fisiológicos y ecológicos en las plantas que les permiten enfrentar el estrés de sequía. La absorción de agua durante el estrés es posible debido a que la planta sintetiza diferentes tipos de protectores osmóticos tales como la glicinabetaína y la prolina (Gorham *et al.* 1985, Delauney y Verna 1985). Se considera que la acumulación de protectores osmóticos conduce a mejorar la tolerancia al estrés osmótico. Por otro lado se ha informado que la regulación de permeabilidad al agua a través de canales de agua también modifican la sensibilidad al estrés hídrico (Aharon *et al.* 2003). Ajustes osmóticos por medio de acumulación de osmoprotectores y regulación de permeabilidad al agua juegan un papel importante en la tolerancia al estrés hídrico (Ueda 2004).

Schulze (1986) señala que las estrategias de las plantas para controlar el agua y resistir la sequía son numerosas. En general, genotipos nativos de climas con marcada estacionalidad son capaces de aclimatarse a las condiciones medioambientales fluctuantes, mejorando su eficiencia en esas condiciones (Pereira y Chávez 1993, 1995). En el caso en que el déficit de agua se presenta lentamente y en forma creciente, las plantas pueden escapar de la deshidratación acortando su ciclo de vida. En el caso de deshidratación rápida, se genera un estrés oxidativo como un efecto secundario que puede ser potencialmente muy dañino para la maquinaria fotosintética (Ort 2001). La capacidad de las plantas para disipar la energía y desarrollar una protección metabólica (inducida o constitutiva) contra los efectos dañinos es un elemento clave propio de mecanismos de tolerancia y pueden ser empleados en el desarrollo de las plantas en estrés de sequía (Flexas *et al.* 2002, Foyer y Noctor 2003).

La escasez de agua determina una alta reducción en el rendimiento de los cultivos y es una de las limitaciones en la expansión a áreas fuera de las actualmente dedicadas a la agricultura (Chaves y Oliveira 2004). Según IPCC (2001) existen evidencias que la aridez

y la frecuencia de eventos climáticos extremos se incrementaran y que la irrigación y el uso de cultivos apropiados es indispensable. Aproximadamente 70% del agua global disponible es empleada en agricultura y 40% de la alimentación del mundo se produce bajo irrigación. La tolerancia de tejido a una deshidratación severa no es común en plantas superiores, incluyendo cultivos, sin embargo es posible encontrarla en especies de ambientes muy secos (Ingram y Bartels 1996).

Se sabe que el mayor efecto de la reducción de la disponibilidad de agua es la disminución de la fijación de carbono en las hojas, debido al cierre de estomas, el cual puede iniciarse con moderados déficits de agua. A nivel de toda planta, la absorción de carbono es más reducida debido a la inhibición temprana de crecimiento (Chávez y Oliveira 2004). Se ha demostrado que la división y expansión celular son directamente inhibidas por estrés hídrico (Zhu 2001). Un crecimiento más lento puede ser un mecanismo adaptativo para la supervivencia de las plantas bajo estrés, porque permite a las plantas cambiar el curso de productos asimilados y energía, que de otro modo serían empleados en el crecimiento de brotes, en moléculas protectoras para defenderse del estrés (Zhu, 2002) o mantener el crecimiento de la raíz para la adquisición de agua (Chávez *et al.* 2003). Esta característica puede ser importante para cultivos destinados a áreas con sequía, pero inconvenientes para áreas donde la sequía es media y esporádica. Por otro lado, la habilidad de acumular agua (y luego removilizarla) de las reservas del tallo es una característica muy importante para mantener crecimiento reproductivo bajo déficit de agua en varias especies, como en los cereales y ciertas leguminosas (Blum *et al.* 1994).

Yang *et al.* (2001) señalan que la acumulación de carbohidratos solubles en las hojas y el tallo de genotipos de trigo están asociadas a la tolerancia a la sequía, los carbohidratos solubles actúan como reguladores del ajuste osmótico y como fuente de carbono para mantener el crecimiento del grano cuando la fotosíntesis es inhibida por el estrés hídrico en la fase post-antesis.

Valdés Valdés *et al.* (2019) estudiaron la acumulación de carbohidratos solubles en genotipos de trigo sometidos a defoliación y estrés hídrico y señalan que la contribución de los carbohidratos en el rendimiento final de los granos estuvo relacionado con una mayor eficiencia de remobilización de los mismos observando diferencias entre los 20 genotipos estudiados.

### **2.2.1 Efecto del estrés hídrico en el contenido relativo de agua**

La tolerancia a la sequía en los cultivos está asociada al grado en que éstos regulan el contenido de agua y el potencial hídrico foliar durante el estrés. “La capacidad de una planta para mantener su estado hídrico a medida que el potencial hídrico del suelo disminuye constituye una adaptación al déficit hídrico” (Acevedo *et al.*, citados por Ortiz *et al.* 2003). y ella se refleja en el Contenido Relativo de Agua (CRA) (Ortiz *et al.* 2003).

El CRA es la expresión más usada para medir el nivel de agua de un tejido (Barrs y Weatherley 1962). Es una medida del contenido de agua del tejido respecto del total de agua que éste puede almacenar, se expresa como porcentaje y permite conocer el estado hídrico de la planta. Se relaciona con el potencial hídrico porque éste y sus componentes, potencial de presión y de solutos, son función del volumen de agua del protoplasma (Ortiz *et al.* 2003). El contenido de agua de la hoja bandera afecta directamente el llenado de grano.

Pérez (2015) estudiando la respuesta al estrés hídrico de cinco variedades encontró que el CRA desciende durante el llenado de grano tanto en el tratamiento de estrés como en el control, pero tuvo una respuesta diferente según la variedad.

Quiriban y Pereyra Cardozo (2017) en un estudio de tolerancia a sequía de trigo (*Triticum aestivum*) encontraron que una suspensión de riego durante 15 días desde el inicio del encañado causó una significativa disminución del CRA ( $p < 0,05$ ) ante la reducción hídrica, variando en promedio de 91,53% en las plantas control a 62,95% en las plantas sometidas a la suspensión del riego.

### **2.2.2 Efecto del estrés hídrico en la eficiencia de uso agua**

La eficiencia de uso de agua (EUA) es un parámetro fisiológico que expresa la capacidad del cultivo de conservar el agua del suelo en la planta, que tiene relación con la tolerancia a la sequía y alto rendimiento potencial (Sinclair *et al.* 1984, Varga *et al.* 2015).

El cálculo de la eficiencia de uso de agua tiene limitaciones según Fischer y Turner (1978),

como la integración de la evaporación del suelo en la estimación del uso de agua y el error al cuantificar el peso de las raíces en la medida de biomasa. Sin embargo, el peso de raíces son sólo una pequeña proporción del total de la biomasa del trigo (menor al 10%), por tal motivo, la medida de la biomasa de la raíz para el cálculo de la Eficiencia de Uso de Agua de los diferentes genotipos no se considera significativa (Morgan y Condon 1986).

### **2.2.3 Efecto del estrés hídrico en la fotosíntesis y el contenido de clorofila**

La fotosíntesis foliar puede estar influenciada por muchos factores de la planta como la edad y posición de la hoja, efectos de reservorio y sombreado propio, así como también factores ambientales como luz, temperatura, disponibilidad de nutrientes y agua (Constable y Rawson 1980). La fotosíntesis, junto con el crecimiento celular, está entre los procesos primordiales afectados por la sequía, hay disminución de la actividad fotosintética por alteraciones de procesos y componentes bioquímicos y el fotosistema II es el más sensible de estos componentes (Chaves 1991, Sainz *et al.* 2010, Anjum *et al.* 2011).

La respuesta fotosintética a la sequía es muy compleja. La disminución del contenido de clorofila bajo estrés debido al estrés oxidativo podría ser el resultado de la fotooxidación de los pigmentos y degradación de la clorofila. Esta involucra interacción en diferentes partes de la célula de la hoja y en diferentes escalas de tiempo en relación al desarrollo de la planta (Chaves *et al.* 2009). A nivel de toda la planta, el efecto del estrés hídrico es identificado por una disminución de la fotosíntesis y el crecimiento de la planta (Chaitanya *et al.* 2003).

Los estomas afectan el flujo de CO<sub>2</sub> en las hojas como también la pérdida de vapor de agua, por lo que la reducción en la conductancia estomática para conservar agua conlleva a una disminución inevitable de la tasa fotosintética. (Ludlow y Muchow 1990)

La concentración de clorofila también presenta cambios en plantas bajo estrés (Rivelli *et al.* 2002). En el maní, se encontró que existe una relación directa cercana de la eficiencia de transpiración con las lecturas del clorofilómetro SPAD (Soil and Plant Analysis-Development) reportada por Nageswara *et al.* (2001), también hay una relación lineal directa con la clorofila extraída de hoja (Yadava 1986). El clorofilómetro SPAD determina las características de transmisión de luz en la hoja, por lo que es un buen estimado de la

concentración de clorofila en la hoja (Takebe *et al.* 1990). Las lecturas en cultivos estudiados mostraron valores significativamente más altos con riego controlado, que con los cultivos con un riego normal (Kashiwagi *et al.* 2006).

Yana Ali (2018) en un estudio realizado para identificar genotipos tolerantes a la sequía encontró que el contenido de clorofila (SPAD) y potencial osmótico no mostraron relación significativa con el rendimiento de los genotipos tolerantes identificados en el estudio.

Guo *et al.* (2018) en el estudio de respuesta al estrés hídrico en plántulas de trigo reportaron que el genotipo JingDong-17 (genotipo de trigo tolerante al estrés hídrico) exhibió índices de crecimiento más altos y una mayor capacidad de fotosíntesis que el genotipo JingDong-8 (genotipo de trigo sensible a la sequía).

Sin embargo, Cardona-Ayala *et al.* (2014) señalan que la disminución del contenido de clorofila inducida por la sequía reportada en numerosas investigaciones, podría ser un mecanismo de defensa de la planta para reducir la presión del exceso de energía sobre los fotosistemas I y II.

#### **2.2.4 Efecto del estrés hídrico en el contenido de prolina**

La prolina es uno de los productos formados por efecto de estrés hídrico, llamado a mantener la función celular por la protección de estructuras de la célula y el ajuste osmótico (Bray 1993). Las rutas metabólicas de la prolina se vuelven más activas para mantener la planta viva bajo condiciones de estrés (Madhava Rao 2006).

Uno de los transportadores de prolina es el ProT2 en *Arabidopsis*, el cual se incrementa bajo sequía y alta salinidad, sugiriendo el incremento de la capacidad de transporte de prolina en plantas bajo sequía (Rentsch *et al.* 1996). La prolina es un soluto compatible al que le han atribuido funciones de estabilización de macromoléculas, depósito de reductores en exceso y almacén de carbono y nitrógeno para utilizar después de restaurarse la planta del déficit hídrico (Raymond y Smirnov 2002). De acuerdo a estas revisiones, la acumulación de prolina juega un rol importante en la aclimatación a una situación de estrés hídrico.

Chorfi y Taïbi (2011) y Marcin'ska *et al.* (2013) evidencian la existencia de acumulación de prolina en trigo sometido a estrés de sequía. La concentración de prolina acumulada es un indicador bioquímico de tolerancia al estrés hídrico (Quiriban y Pereyra Cardozo 2017). La respuesta de cultivos de trigo a estrés hídrico muestra una acumulación diferencial de prolina y denotando que la mayor cantidad de prolina acumulada la presenta el cultivo más estable frente al estrés.

Yana Ali (2018) en estudios de tolerancia al estrés de sequía de trigo encontró que los genotipos con mayor capacidad de acumular prolina libre y nitrato reductasa, fueron los más tolerante a condiciones de sequía.

### **2.2.5 Efecto del estrés hídrico en el contenido de proteína de grano**

La proteína es considerada como el nutriente más importante para humanos y animales, por ello el valor nutricional del trigo es extremadamente importante al tomar un lugar referencial entre las pocas especies de cultivos que crecen extensamente como fuente de alimentos básicos (Šramková *et al.* 2009). Los granos de cereales tienen un aporte proteico en su composición que va del 8 al 12% en promedio y en el trigo se considera un aporte del 12% según Latham (2002) y entre 10% y 18% según Šramková *et al.* (2009).

El déficit hídrico en las células conlleva a la denaturación de proteínas y como respuesta a este déficit ocurren cambios en el estatus de la fosforilación de proteínas en segundos (Bray 1997). Por lo tanto, el estrés hídrico generalmente ha incrementado el contenido de proteínas en variedades de trigo harinero al darse una reducción del endosperma causando un menor peso de grano y aumento del contenido proteico mencionado (Ahmad y Arain 1999).

## **2.3 MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA DESARROLLAR TOLERANCIA AL ESTRÉS DE SEQUÍA**

Durante la década de los 60 el mejoramiento genético de plantas estuvo orientado a desarrollar variedades para ambientes favorables, actualmente el mejoramiento está también orientado al desarrollo de variedades en condiciones desfavorables de clima y suelo. En recientes décadas se ha intensificado la investigación para conocer la respuesta

de las plantas a diferentes tipos de estreses como la sequía (Chávez *et al.* 2003, Flexas *et al.* 2004).

Una forma de incrementar la productividad en condiciones adversas es desarrollar variedades con mayor tolerancia al estrés. Sin embargo, el éxito de mejorar por tolerancia al estrés está limitado por: a) la tolerancia al estrés está controlada por muchos genes y su selección simultánea es difícil (Richards 1996, Yeo 1998, Flowers *et al.* 2000); b) se requiere de mucho esfuerzo para eliminar genes indeseables que son incorporados durante el proceso de mejoramiento (Richards 1996), y c) necesidad de un procedimiento de selección efectivo particularmente en condiciones de campo (Ribaut *et al.* 1997), sin embargo sobre este último punto, se tienen estudios recientes similares a este afinando procedimientos de selección efectivos (Mwadzingeni *et al.* 2016).

Los cultivos de trigo en la zona de sierra, casi siempre se ven afectados por la sequía durante la época de cultivo. La precipitación promedio en la sierra peruana varía de 500 a 1200mm al año, sin embargo su distribución es errática afectando el cultivo en diferentes estadios de desarrollo. Este efecto es negativo y se va incrementando con el cambio global climático. Por lo que es necesario seleccionar genotipos de trigo que tengan altos rendimientos bajo condiciones de sequía.

Según Bidinger *et al.* (1987), el rendimiento bajo estrés hídrico depende generalmente de tres factores: rendimiento potencial, fecha de floración y resistencia al estrés. La magnitud del efecto de cada uno de estos factores en el rendimiento bajo estrés está asociado a la especie y sus variedades.

El rendimiento potencial ( $Y_p$  – Potential Yield) es el rendimiento en un medio ambiente determinado, sin problemas de fertilización ni agua y donde otros estreses se controlan efectivamente y el genotipo está adaptado. Se ha demostrado que hasta un grado de estrés las variedades con alto potencial de rendimiento pueden rendir más que las variedades resistentes al estrés. Si el estrés aumenta a un cierto nivel puede ocurrir que el genotipo de mayor rendimiento potencial rinda menos que otros de menor rendimiento potencial (Acevedo *et al.* 1999).

Cuando la sequía se va intensificando en el tiempo o ocurre en la fase final del cultivo, la

elección de genotipos precoces es una buena alternativa para lograr rendimientos económicos (Blum 1988). Algunos cultivos como los cereales (Blum *et al.* 1994, Gent 1994) y leguminosas (Chaves *et al.* 2002), acumulan reservas en los tallos antes de la antesis, los cuales pueden ser utilizados para el llenado de los granos en adición a los asimilados presentes, contribuyendo de esa manera a un mejor índice de cosecha. Bajo condiciones de estrés (Blum *et al.* 1994) o con ritmos de respiración alta (por ejemplo, altas temperaturas) las reservas de los tallos son importantes para completar el llenado del grano (Gent 1994). El potencial de almacenar en el tallo depende de la longitud del tallo y del peso-densidad, aunque esos caracteres por si no son suficientes para asegurar que las reservas serán translocadas al fruto. La movilización de reservas depende de la fuerza de la fuente de recepción, la cual varía con los genotipos y es afectada por el medio ambiente (como la disponibilidad de agua). Por otro lado el tallo (particularmente los tejidos vasculares) está especialmente protegido de los estreses del medioambiente. En estudios en *Lupinus* sometidos a sequía se encontró que los tejidos vasculares del tallo nunca bajan su contenido relativo de agua debajo de 83%; mientras que otros órganos de la planta presentaron valores por debajo de 60%, las hojas por ejemplo 57%, las raíces 58% y la corteza del tallo 58%. (Pinheiro *et al.* 2004). Se puede especular que se debe a la presencia de asimilados; principalmente glucosa, fructosa y sacarosa cuya concentración en estos tallos se dobla en presencia de déficit de agua (Pinheiro *et al.* 2001). Esos azúcares también pueden actuar como señales.

El secado controlado del suelo puede promover la removilización de reservas de carbono durante el llenado del grano de trigo y mejorar el índice de cosecha; especialmente cuando el cultivo está creciendo en condiciones de alta disponibilidad de nitrógeno (Yang *et al.* 2000, 2001). De hecho, bajo esas condiciones, una disminución de humedad media contrarresta la demora de la senescencia de los tejidos vegetativos que usualmente acompaña el uso de dosis altas de N, y mejora la removilización de las reservas del tallo a los granos. Permanecer-verde (stay green) por mucho tiempo resulta en la no-removilización de las reservas pre-antesis en la hojas, glumas y tallos, las cuales contribuyen con 30 a 47% en el carbono en la proteína y 8 a 27% en el carbono de los carbohidratos depositados en los granos (Gebbing y Schnyder 1999). En China, si la maduración se demora, vientos desecantes al final de la estación puede deshidratar el trigo muy rápidamente y reducir el rendimiento. Yang *et al.* (2001) mostraron que aplicando una moderada desecación en el suelo e induciendo una temprana senescencia, se puede acelerar

el llenado del grano y mejorar el rendimiento. Sin embargo en regiones que no tienen estas limitaciones descritas arriba, extendiendo el periodo de llenado del grano, y por consiguiente retardando la senescencia de la hoja podría favorecerse el rendimiento permitiendo más tiempo para la translocación de asimilados al grano (Richards *et al.* 2001). Esto puede regularse ya sea a través de la irrigación o seleccionando plantas con la característica de permanecer-verde (stay green).

Aún trabajos simples de mejoramiento de la tolerancia a déficit de agua en los cultivos y uso eficiente de agua pueden conducir a un aumento del rendimiento y promover el ahorro de agua. Uno de los retos más grandes del mejoramiento es desarrollar plantas no solo capaces de sobrevivir el estrés sino capaces de crecer en estrés con una producción aceptable de biomasa, superando la relación negativa entre los caracteres de resistencia a sequía y productividad. Esto requiere mejorar la eficiencia en mantener homeostasis, desintoxicar las células de elementos negativos y recobrar crecimiento que es reducido en condiciones de estrés osmótico (Xiong y Zhu 2002).

Los programas de mejoramiento actuales incluyen entre sus objetivos desarrollar variedades tolerantes al estrés hídrico utilizando la variabilidad genética reportada para varios caracteres relacionados (Castro *et al.* 2011, Castro *et al.* 2012).

Li *et al.* (2011), Bagrei y Bybordi (2015) y Martínez Cruz *et al.* (2020) señalan la importancia de evaluar los genotipos de diferente origen y en diferentes grados de segregación empleando caracteres relacionados al rendimiento que serían más afectados por diferentes niveles de estrés hídrico.

Guo *et al.* (2018) señalan la necesidad de conocer los efectos del estrés por sequía en el metabolismo de las plantas para mejorar la tolerancia a la sequía del trigo y utilizar los recursos genéticos para el desarrollo de variedades de trigo tolerantes al estrés por sequía.

Aumentar el potencial de rendimiento de grano del trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y el desarrollo de variedades resistentes son importantes para la seguridad alimentaria. El mejoramiento genético permite el desarrollo de genotipos que toleren las fluctuaciones de temperatura, la baja precipitación, las lluvias erráticas y condiciones climáticas extremas (Hatfield y Dold 2018, Venske *et al.* 2019).

## 2.4 EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL RENDIMIENTO POTENCIAL DEL CULTIVO

El rendimiento potencial de un cultivo es considerado como el rendimiento bajo condiciones óptimas de los factores involucrados en la producción, con aprovechamiento de los nutrientes transformados en el producto de consumo requerido por el agricultor, bajo las mejores condiciones agrícolas. Éste se ve afectado cuando se somete el cultivo a alguna variable que altera la producción como es el estrés hídrico generado por sequías en zonas de agricultura bajo condiciones de secano.

El índice de susceptibilidad a la sequía (Drought Susceptibility Index –DSI) o índice de susceptibilidad al estrés (Stress Susceptibility Index –SSI) introducido por Fischer y Maurer (1978), se genera para relacionar el potencial de rendimiento de un cultivo bajo óptimas condiciones y el rendimiento bajo condiciones de estrés dependiente de la intensidad del estrés generado, e identificar genotipos tolerantes a la sequía y genotipos susceptibles a la sequía. Es por ello que a los genotipos con valores del índice de susceptibilidad al estrés  $SSI < 1$  se les denomina genotipos tolerantes y a los genotipos con  $SSI > 1$  se les denomina genotipos susceptibles (Guttieri *et al.* 2001, Bahar y Yildirim 2010), y Meena *et al.* (2015) también consideran a genotipos con  $SSI < 1$  como resistentes a la sequía. La denominación intensidad de sequía (Drought Intensity – D) o intensidad de estrés (Stress Intensity – SI) corresponde a la razón entre el promedio del rendimiento de todos los genotipos empleados bajo estrés hídrico del ensayo y los genotipos con condiciones óptimas, toma valores entre 0 y 1 siendo condiciones de estrés más severo cuando es mayor su valor (Dodig *et al.* 2008, Patel *et al.* 2017), Mohammadi (2019) categoriza a la intensidad de estrés como ligero ( $SI < 0.3$ ), moderado ( $0.3 < SI < 0.6$ ) y severo ( $SI > 0.6$ ).

El índice de tolerancia a la sequía (Drought Tolerance Index – DTI) o índice de tolerancia al estrés (Stress Tolerance Index – STI) es similar al SSI con la excepción que se basa en el porcentaje de rendimiento del cultivo obtenido bajo estrés en lugar de la reducción obtenida respecto al cultivo bajo condiciones óptimas (Ober *et al.* 2004). Este índice determina la tolerancia potencial a la sequía de cada genotipo (Ali *et al.* 2019).

La producción media (Mean productivity – MP) e índice de tolerancia (TOL) permite la comparación entre cultivos, la correlación de tolerancia y la producción media es negativa cuando la variación genética en ambientes de estrés es menor que la variación genética que en medios sin estrés (Rosielle y Hamblin 1981, McCaig y Clarke 1982, Patel *et al.* 2017). La producción geométrica media (Geometric mean productivity – GMP) es empleada por mejoradores interesados en el desempeño relativo al tener estrés por sequía variable en severidad en campo a través de los años (Fernandez 1993, Ramirez-Vallejo y Kelly 1998, Talebi *et al.* 2009).

Los indicadores son separados en dos clases: clase I y clase II. En la clase I el genotipo con mayor producción media (MP), producción geométrica media (GMP) e índice de tolerancia al estrés (STI) tiende a ser más tolerante al estrés de sequía y poseer más alto rendimiento potencial (Thiry *et al.* 2016, Mohammadi 2019, Patel *et al.* 2019). Por otro lado, en la clase II el genotipo con menor reducción de rendimiento (Red), índice de tolerancia al estrés (TOL) e índice de susceptibilidad a la sequía (SSI) tiende a ser el genotipo más tolerante al estrés, y el genotipo con mayor Red, TOL y SSI tiende a ser el genotipo susceptible al estrés (Thiry *et al.* 2016, Mohammadi 2019). Por ello, en los indicadores en Clase I los valores más altos son los deseables y en los indicadores de Clase II los valores inferiores son los deseables (Mohammadi 2019).

La integración de estos índices la realizan con el fin de tener un valor entre 1 y 10 designado como índice de puntuación múltiple (Multiple Scoring Index – MSI), que permite una simple y fácil visualización y estimación de la tolerancia/susceptibilidad bajo estrés de sequía de productividad y/o genotipos contrastantes de acuerdo al rendimiento de grano, donde el MSI más próximos a 1 indica genotipos “buenos” para ser usados en programas de mejoramiento, evidenciado en la correlación significativa que tiene el MSI con el rendimiento y el peso de 100 granos (Thiry *et al.* 2016, Mohammadi 2019).

La eficiencia de tolerancia a la sequía (Drought Tolerance Efficiency – DTE) junto con el índice de estabilidad del rendimiento (Yield Stability Index – YSI) evidencian el porcentaje o proporción de rendimiento bajo estrés en base al rendimiento potencial, denotando el efecto de estrés en el cultivo y son considerados como parámetros importantes para evaluar los genotipos bajo estrés de sequía, al permitir encontrar genotipos tolerantes o resistentes en programas de mejoramiento genético (Fischer y Wood

1981, Bahar y Yildirim 2010, He *et al.* 2013).

Valdés Valdés *et al.* (2017) estudiaron la respuesta al estrés hídrico de 20 genotipos seleccionados por su respuesta a la reducción de fuente (defoliado y sin defoliar) e indican que se redujo significativamente la biomasa, rendimiento, número de granos por espiga, peso individual de grano e índice de cosecha (10, 13, 4, 9 y 4%) por efecto del estrés hídrico.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL BIOLÓGICO

Se empleó semillas de tres genotipos ó líneas avanzadas de *Triticum aestivum* “trigo” pertenecientes al banco de germoplasma del Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, seleccionadas en base a rendimiento alto, mediano y bajo en condiciones de estrés hídrico obtenidos en un ensayo previo (Amado Argüelles 2016), siendo su origen (Nº de Línea/Código/Origen):

- Línea G1: PITH-23 LM08B    VEE/LIRA//BOW/3/BCN/4/KAUZ.
- Línea G2: ERTH5-107 VM08    PFAU/BOW//VEE#9/3/BAU/OPATA.
- Línea G3: ERTH4-117 VM08    VEE/LIRA//BOW/3/BCN/4/KAUZ.

#### 3.2 METODOLOGÍA

##### 3.2.1 Instalación del experimento

###### a. Lugar de experimentación

El estudio se realizó en el Programa de Cereales y Granos Nativos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.

Distrito	:	La Molina
Provincia	:	Lima
Departamento	:	Lima
Latitud	:	12° 04' 41.05" S
Longitud	:	76° 56' 36.45" O
Altitud	:	243 m s.n.m.

## b. Información meteorológica

La estación agrometeorológica Alexander Von Humboldt de la Molina (243.7 m s.n.m.) tiene registrada una precipitación promedio anual de 11.9mm, temperatura promedio anual de 20°C y humedad relativa promedio anual de 84%. El clima de la zona es clase desértico árido sub-tropical costanero (dd-S) según la clasificación de Holdridge (1960a, 1960b) sobre las zonas de vida.

Las condiciones climáticas en el interior de la casa de malla antiáfida del tinglado (Figura 3) fueron registradas con el sensor de temperatura y humedad relativa marca “HOBO” modelo U23-001 (Onset Computer Corporation, 470 MacArthur Blvd., Bourne, MA, USA). La temperatura promedio en la fase experimental fue 19.4°C, con temperatura máxima registrada de 32.0°C y temperatura mínima de 12.3°C. La temperatura máxima promedio fue de 25.5°C y la temperatura mínima promedio fue de 16.1°C.

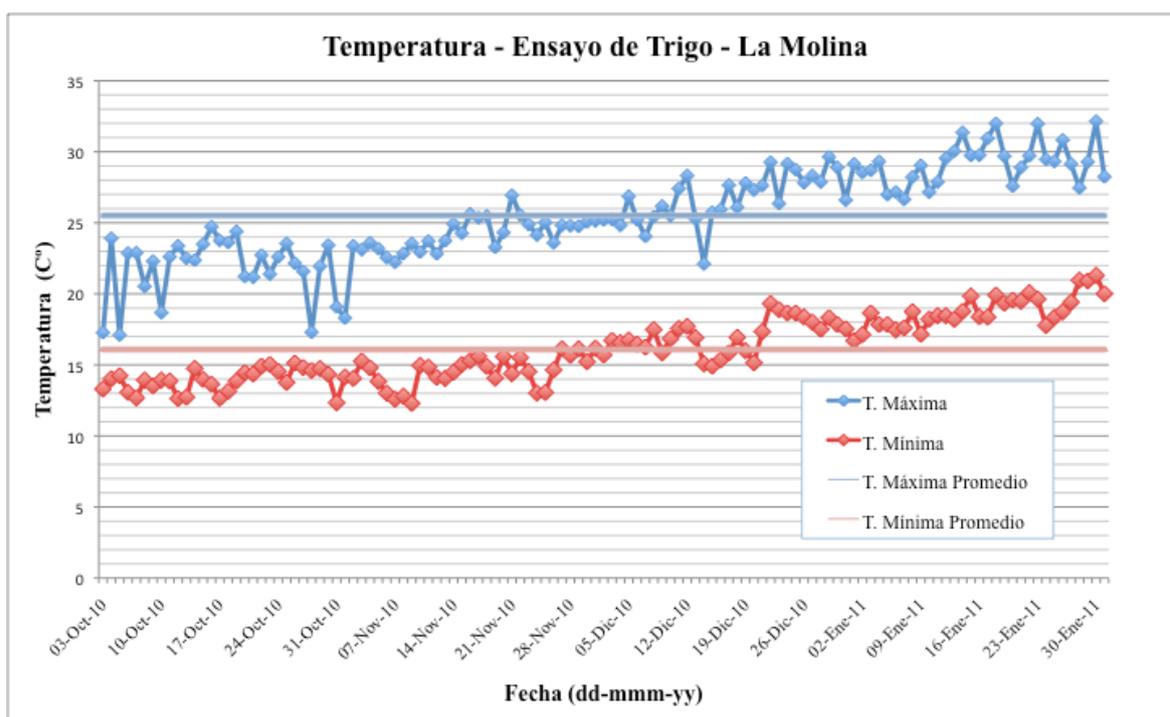


Figura 1: Registro meteorológico de la temperatura en casa malla - tinglado durante la fase experimental. La Molina – Lima.

La humedad relativa promedio durante la fase experimental fue 79.3% con una máxima de 95,6% y mínima de 42.9%. La humedad máxima promedio fue 91.5% y la humedad mínima promedio fue 59.2%.

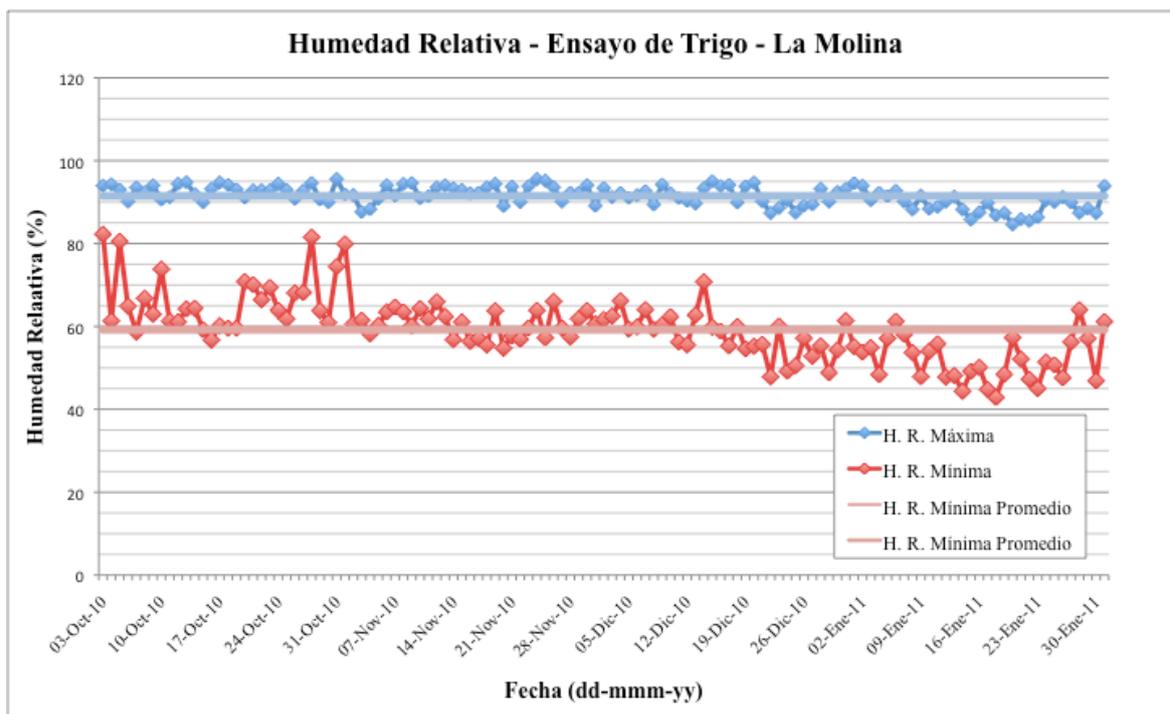


Figura 2: Humedad relativa registrada en el tinglado durante la fase experimental. La Molina Lima.

### c. Características de suelo y agua de riego

El suelo empleado es un sustrato preparado y analizado en el Laboratorio de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (ver Tabla 1). La caracterización del sustrato corresponde a la clase textural franco arenoso, siendo importante su estructura para el desarrollo de las plantas por la influencia que tiene en la aireación, permeabilidad y retención de agua. El pH es neutro, lo que permite la disponibilidad de la mayoría de nutrientes para la asimilación por la planta. El contenido calcáreo total es cero y la conductividad eléctrica (3.37dS/m) indica que es un suelo ligeramente salino. El porcentaje de materia orgánica es alto (4.75%), lo cual permite una buena estructura, permeabilidad y aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El contenido de fósforo y potasio disponible es alto. Los valores determinados para el CIC son una medida de la fertilidad potencial del suelo, y las relaciones catiónicas (K/Mg) indican que hay deficiencias de magnesio (Tabla 1).

El agua empleada proviene de canales de regadío del Río Rímac. El análisis del agua se realizó en el Laboratorio de Análisis de suelos y plantas de la UNALM. (Ver Tabla 2).

Tabla 1. Análisis de caracterización del suelo empleado en el experimento de déficit hídrico de 15 líneas avanzadas de trigo. La Molina – Lima.

	Valor	Unidades
pH	6.72	Unidad de pH
C.E.	3.37	dS/m
CaCO <sub>3</sub>	0.00	%
M.O.	4.75	%
P	39.0	ppm
K	429	ppm
Arena	66	%
Limo	28	%
Arcilla	6	%
Clase textural	Fr A.	
CIC	15.36	
Ca <sup>+2</sup>	12.53	meq/100g
Mg <sup>+2</sup>	1.73	meq/100g
K <sup>+</sup>	0.74	meq/100g
Na <sup>+</sup>	0.36	meq/100g
Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>	0.00	meq/100g
Suma de cationes	15.36	
Suma de bases	15.36	
% Sat. de bases	100	%

Tabla 2. Análisis de agua de riego empleada el experimento de déficit hídrico de 15 líneas avanzadas de trigo. La Molina - Lima.

	Valor	Unidades
pH	6.42	Unidad de pH
C.E.	0 48	dS/m
Calcio	3.82	meq/100g
Magnesio	0.56	meq/100g
Potasio	0.18	meq/100g
Sodio	0.64	meq/100g
SUMA DE CATIONES	5.20	
Nitratos	0.02	meq/100g
Carbonatos	0.00	meq/100g
Bicarbonatos	2.21	meq/100g
Sulfatos	1.36	meq/100g
Cloruros	1.50	meq/100g
SUMA DE ANIONES	5.09	
Sodio	12.31	%
RAS	0.43	
Boro	0.13	ppm
Clasificación	C2-S1	

La clasificación del agua de acuerdo a la conductividad eléctrica y la relación de absorción de sodio determina que el agua empleada pertenece a la clase C2-S1, que significa que el peligro de salinidad es medio y el peligro de sodio es bajo.

#### **d. Instalación de experimento**

La siembra fue en macetas de plástico con 4.5 kilos de suelo, compuesto por 50% suelo esterilizado franco arenoso y 50% compost y vermiculita. Es preciso mencionar que se tuvo la relación de 0.5 Kg. de vermiculita con 50 Kg. de compost en el 50% adicionado al suelo estéril.

En la base de la maceta se colocó una malla para evitar la pérdida de suelo por los orificios inferiores de la maceta. También se colocó platos de plástico en la base para evitar la pérdida de agua por gravedad.

En la siembra, se plantó 30 semillas por maceta. El desahije o raleo se realizó entre el día 30 y 35 después de la siembra, quedando diez plántulas por maceta. Antes de iniciar el espigado, las macetas se sellaron con lámina de plástico para evitar la evaporación del agua del suelo. El plástico cubrió el sustrato evitando la evaporación, y dejando descubiertos los tallos y hojas de las plantas de trigo para la transpiración de las plantas. El tratamiento de riego diferenciado inició en el espigado.

### **3.2.2 Metodología operacional**

Cada línea avanzada (o genotipo) fue sembrada en 45 macetas y distribuidas al azar en el interior de la casa de malla antiáfida del tinglado (Figura 4). Se tomaron cinco macetas de cada línea avanzada al azar en el inicio de la fase de espigado para determinar la biomasa inicial, altura de planta y contenido relativo de agua antes de aplicar el tratamiento de riego limitado. Las macetas restantes se emplearon en la evaluación de las variables agronómicas, fisiológicas y bioquímicas, considerando un número de repeticiones adecuadas para el análisis de los resultados. La selección de las macetas de tratamiento de riego limitado se realizó al azar. El tratamiento de riego diferenciado inició en el espigado.

#### **a. Mediciones agronómicas**

En las variables agronómicas se consideró el promedio de diez plantas correspondientes a

una maceta como unidad experimental; se tuvo nueve repeticiones, por lo tanto, se emplearon 18 macetas de cada línea o genotipo, nueve con riego normal u óptimo y nueve con riego limitado.

Los días a la antesis se registraron desde la emergencia de las plántulas hasta cuándo 50% de las espigas tenían las anteras visibles, y los días a la madurez se consideraron desde la emergencia de las plántulas hasta cuando el 50% de las espigas mostraron la pérdida total del color verde (Lopes y Reynolds 2011). El periodo de llenado de grano se obtuvo de la diferencia de los días a la antesis y días a la madurez (Lopes y Reynolds 2011).

La altura de planta fue medida desde la base de la planta a la punta del macollo principal exceptuando la espiga (Qaseem *et al.* 2018). Las mediciones se realizaron en dos puntos, la primera fue en la fase fenológica del espigado o 5.0 en la escala de Zadoks (Zadoks *et al.* 1974), momento previo a la aplicación de riego limitado, y la segunda en la cosecha. Se consideró el crecimiento en altura del periodo de estrés, en base a la diferencia de altura entre las dos mediciones realizadas.

La biomasa total se obtuvo de la suma del peso de la biomasa de tallo, biomasa de hojas y biomasa de espigas colocadas en bolsas de papel y secadas en una estufa a 70°C, hasta alcanzar peso constante (Peng *et al.* 1998), cuando las plantas alcanzaron el 10% de la tasa normalizada de transpiración.

El rendimiento se obtuvo en base al peso de granos promedio obtenido por planta en la maceta secados a 70°C en el horno (Fischer y Maurer 1978) y con una humedad aproximada de 14%. El número de granos por planta se obtuvo calculando el promedio producido por planta de la maceta en base al conteo de los granos obtenidos por maceta. El peso de 100 granos se obtuvo tomando el promedio de dos muestras al azar de 100 granos de una maceta en la cosecha (Fischer y Maurer 1978). El número de espigas por planta fue determinado en la fase de floración del trigo ó 6.0 en la escala de Zadoks (Pokharel *et al.* 2015). El índice de cosecha se obtuvo dividiendo el rendimiento o peso de granos entre la biomasa total (Sayre *et al.* 1997, Fischer y Maurer 1978).

#### **b. Mediciones fisiológicas**

Uno de los elementos fundamentales en la formación de nuevos tejidos es el agua,

absorbida del suelo por la raíz primordialmente y forma parte de procesos fisiológicos en la planta como son la fotosíntesis y la transpiración (Fitter y Hay 2002).

Las mediciones de fotosíntesis (en unidades  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) se realizaron con el equipo TPS-2 Portable Photosynthesis System entre las 9:00 y 12:00 hrs. en el espigado, a los 14 días y a los 33 días del espigado. Se consideró la zona media de la hoja bandera y la 2da hoja, tratando de cubrir totalmente el área de la cubeta del equipo empleado, en una de las plantas de la maceta. Se realizó en diez macetas de cada genotipo, cinco macetas con riego normal u óptimo y cinco macetas con riego limitado, tomadas al azar.

Las mediciones de clorofila (en unidades SPAD) se obtuvieron con el equipo SPAD-502Plus Chlorophyll Meter Konica Minolta entre las 9:00 y 12:00 hrs. en el espigado, a los 10 días y a los 20 días del espigado. Las tres mediciones que se hicieron en la tercera hoja de una planta de la maceta (Kashiwagi *et al.* 2006, Lopes *et al.* 2012), se promediaron y registraron como la unidad experimental o muestra para esta característica. Se realizó en dieciocho macetas de cada genotipo, nueve macetas con riego normal u óptimo y nueve macetas con riego limitado, tomadas al azar.

La transpiración o agua empleada diaria por planta se calculó en base a la diferencia de pesos diarios de las macetas (Sinclair y Ludlow 1986, Samarakoon 1995). Las macetas fueron cubiertas al inicio de la fase de espigado, dejando solo el follaje libre, para evitar la pérdida por evaporación del agua del suelo. La tasa relativa de transpiración (normalizada) de cada maceta bajo estrés hídrico se obtuvo de la razón entre la transpiración de cada maceta bajo riego limitado y el promedio de la transpiración obtenida en las macetas bajo riego normal u óptimo (Sinclair y Ludlow 1986). La transpiración total durante el tratamiento diferenciado de riegos se calculó en base a la sumatoria de la transpiración diaria desde el espigado hasta la cosecha de la planta.

El CRA se registró al inicio de la fase de espigado y cuando las macetas bajo riego limitado alcanzaron el 10% de su transpiración normalizada. En el inicio de la fase de espigado se tomó las hojas bandera de cinco macetas de cada genotipo, y en el final de la fase de madurez de grano se tomó diez macetas de cada genotipo, cinco macetas con riego normal u óptimo y cinco macetas con riego limitado, al azar. Las hojas fueron pesadas, colocadas en agua destilada a 4°C hasta el día siguiente y pesadas otra vez, finalmente

fueron secadas a 80°C por 48 horas y pesadas nuevamente (Saeedipour y Moradi 2011). Con estos datos se calculó el CRA con la siguiente fórmula (Barrs y Weatherley 1962):

$$CRA (\%) = \frac{(P_f - P_s)}{(P_t - P_s)} \times 100$$

Donde:  $P_f$  es peso fresco inicial,  $P_s$  es peso seco,  $P_t$  es peso fresco turgente.

La eficiencia de uso de agua en términos del índice de cosecha (EUA) durante el periodo de riego diferenciado se obtuvo adecuando la fórmula de Misra *et al.* (2010) a las condiciones del ensayo. Tomando en cuenta que no hubo evaporación del suelo ( $E=0$ ) por la cobertura realizada de la maceta y que la transpiración se tomó desde el espigado, el cálculo se hizo considerando la siguiente fórmula:

$$EUA = HI \times \frac{(M_i - M_o)}{T}$$

Donde: HI corresponde al índice de cosecha,  $M_i$  es biomasa final,  $M_o$  corresponde a la biomasa al iniciar el registro de la transpiración, T es la sumatoria de la cantidad de agua transpirada diaria desde la aplicación de riego diferenciado hasta la cosecha.

### **c. Mediciones bioquímicas**

El estrés hídrico induce numerosas irregularidades metabólicas en plantas (Bates *et al.* 1973), por ello se consideró la medición de la prolina y el porcentaje de contenido proteico del grano.

El porcentaje de contenido proteico se obtuvo con el equipo INFRATEC 1255 Food & Feed Analyzer (FOSS-TECATOR), a través de espectrofotometría NIR (Near Infrared).

La prolina se incrementa rápidamente en la planta bajo estrés hídrico (Johari-Pireivatlou 2010), por lo tanto es considerado como un parámetro de evaluación en la selección de variedades tolerantes a la sequía (Bates *et al.* 1973). El contenido de prolina fue determinado según el método de Bates *et al.* (1973) modificado (Anexo 1). La determinación de prolina se hizo en las hojas bandera junto con la segunda y tercera hoja de cada planta con el fin de alcanzar el peso mínimo de 100gr para la realización de la prueba, en cuatro macetas con riego normal u óptimo y cuatro macetas con riego limitado por cada genotipo. Las lecturas del espectrofotómetro Genesys 20 Spectrophotometer Thermospectronic permitieron determinar la concentración de prolina siguiendo la curva

estándar en base al peso fresco y el uso de la fórmula siguiente:

$$\frac{[(\mu\text{g prolina/mL} \times \text{Tolueno mL})/115.5 \mu\text{g}/\mu \text{ moléculas}]}{[(\text{g muestra})/5]} = \mu\text{moles Prolina/g de peso fresco del material}$$

#### d. Indicadores de selección frente al estrés hídrico

Se hallaron los siguientes indicadores de selección de cultivos frente al estrés hídrico:

- El índice de tolerancia al estrés (STI), se obtuvo con la siguiente fórmula (Fernandez 1993, Ober *et al.* 2004):

$$STI = \frac{Yp \times Yd}{\bar{Yp}^2}$$

Donde:  $\bar{Yp}$  es el promedio del rendimiento de las líneas de trigo bajo riego óptimo, Yd es el rendimiento de grano (en gramos) bajo riego limitado promedio de cada genotipo, Yp es el rendimiento de grano (en gramos) en condiciones normales de cada genotipo.

- La productividad media (MP) y la productividad geométrica media (GMP) se calcularon con las siguientes fórmulas (McCaig y Clarke 1982, Ramirez-Vallejo y Kelly 1998, Patel *et al.* 2017):

$$MP = \frac{Yp + Yd}{2}; \quad GMP = \sqrt{\bar{Yp} \times Yd}$$

- El índice de susceptibilidad al estrés (SSI), se calculó en base a:

$$SSI = \frac{1 - (Yd/Yp)}{SI}$$

Donde: SI es la intensidad de estrés  $SI = 1 - (\text{promedio del rendimiento de todas las líneas de trigo bajo riego limitado} / \text{promedio del rendimiento de todas las líneas de trigo bajo riego normal})$ , (Fischer y Maurer 1978, Fischer y Wood 1979, Kumar *et al.* 2012, He *et al.* 2013, Abdolshahi *et al.* 2013).

- El índice de tolerancia (TOL) en términos del rendimiento en gramos por planta (Rosielle y Hamblin 1981):

$$TOL = Yp - Yd$$

- El índice de puntuación múltiple (MSI) se obtuvo a partir de puntuaciones que tomaron los indicadores mencionados (STI, GMP, MP, SSI y TOL) de acuerdo a Mohammadi 2019, que planteó una la escala con rango obtenido de la diferencia del valor máximo y mínimo dentro de cada indicador. Este rango fue dividido en diez partes del 1 al 10 y cada parte fue equivalente a 10%, 20%, hasta 100% del rango, esto fue aplicado a los indicadores de clase I (STI, GMP y MP) donde los valores altos son los deseables, y en clase II (SSI y TOL) se invirtieron los valores dado que los menores valores son los deseables. La forma de cálculo de las puntuaciones se detalla en el Anexo 5. Posterior a ello se promediaron las puntuaciones asignadas a los índices dando lugar al MSI con la siguiente fórmula (Mohammadi 2019):

$$MSI = \frac{STIs + GMPs + MPs + SSIs + TOLs}{5}$$

Donde: los acrónimos de los indicadores acompañados de “s” significan la puntuación obtenida para cada indicador.

- La eficiencia de la tolerancia a la sequía (DTE) y el índice de estabilidad del rendimiento (YSI), se obtuvo en base a (He *et al.* 2013):

$$YSI = \left( \frac{Yd}{Yp} \right) \quad ; \quad DTE = \left( \frac{Yd}{Yp} \right) \times 100$$

Donde: DTE tiene valores en porcentaje de 0 a 100%, y YSI en proporción con valores entre 0 y 1.

#### e. **Diseño experimental**

El diseño experimental considerado fue un diseño completamente al azar (DCA) de acuerdo a las características del ensayo (Montgomery 1991). Se realizó la prueba de medias t-Student entre los tratamientos de riego para cada línea avanzada o genotipo; se halló la comparación de medias de Tukey entre las líneas bajo el mismo régimen de riego, correlación de Pearson (*r*) entre variables y p-value (*p*) de la correlación. Los análisis estadísticos se ejecutaron con el software SAS (Bravo 2004, SAS Institute Inc. 2015) y Microsoft Excel 2003.

Los ambientes de Riego evaluados fueron:

- S: Riego limitado, reducción gradual del agua disponible total en la maceta, hasta llegar al 10% de capacidad de campo desde la fase del espigado.

- R: Riego normal u óptimo, la planta tiene agua disponible en un suelo con 80% de la capacidad de campo durante su crecimiento y desarrollo.

El tratamiento considerado para cada ambiente de riego fue dado por los tres genotipos o líneas avanzadas evaluados:

- G1: PITH-23 LM08B VEE/LIRA//BOW/3/BCN/4/KAUZ.
- G2: ERTH5-107 VM08 PFAU/BOW//VEE#9/3/BAU/OPATA.
- G3: ERTH4-117 VM08 VEE/LIRA//BOW/3/BCN/4/KAUZ.

La relación lineal entre variables dependientes se evaluó a través del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). El valor de la correlación entre cualquier par de variables es un número entre -1 y 1, el valor cercano a 1 o -1 indica que existe alguna relación de causa-efecto entre las variables, por el contrario si el valor es 0 indica que no hay relación (Galbiati, 2007). Los valores de correlación tienen grado débil si su valor está entre -0.5 y 0.5, y tienen grado fuerte si están entre -1 y -0.8 o 0.8 y 1 (Nieves y Domínguez, 2009). El valor p-value ( $p$ ) permitió determinar la significancia del coeficiente de correlación cuando es diferente de cero y existe una relación lineal entre las variables, tomando en cuenta que el valor p es menor a 0.05.

La unidad experimental fue una maceta con diez plántulas. Las unidades fueron distribuidas al azar.

#### f. Ubicación de las unidades experimentales



Figura 3: Macetas en casa de malla antiáfida del tinglado.

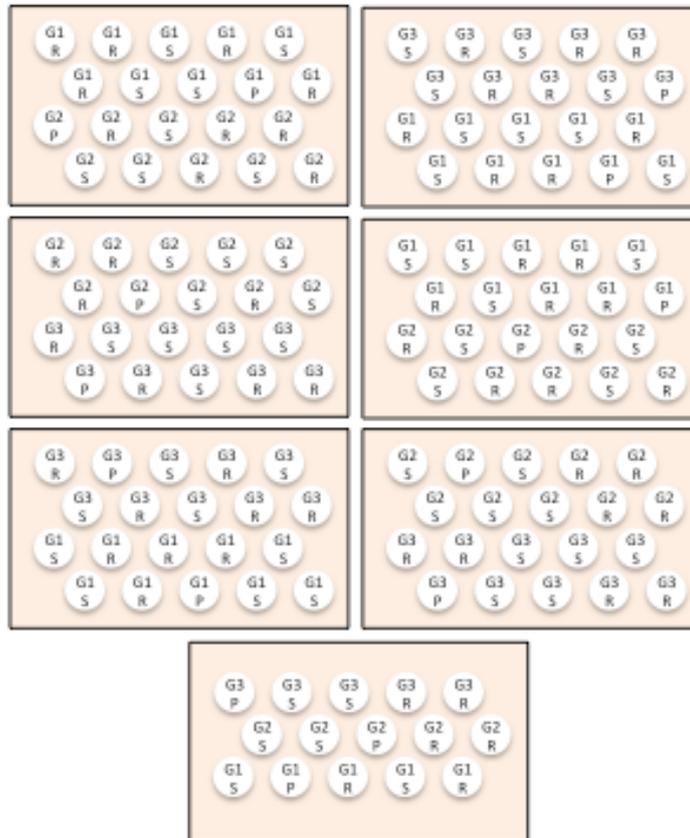


Figura 4: Distribución de unidades experimentales.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS, FISIOLÓGICAS Y BIOQUÍMICAS**

#### **4.1.1 Características agronómicas**

En la Tabla 3 se presentan los cuadrados medios del ANVA de las características agronómicas días a la antesis, días a la madurez, altura de planta, biomasa e índice de cosecha. En los días antes de antesis, las plantas tuvieron tratamiento de riego óptimo, los riegos diferenciados empiezan en la fase de espigado, el análisis de varianza se hizo para determinar la igualdad o diferencia entre las líneas avanzadas de trigo. El análisis de varianza de los días a la antesis de las líneas de trigo denotó diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.01$ ). Para los días de llenado de grano (días entre antesis y madurez), días a la madurez, altura de planta y biomasa de las líneas de trigo bajo riego limitado y bajo riego normal u óptimo se observó diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ). Para el índice de cosecha bajo riego limitado muestra diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.01$ ) y para riego normal u óptimo no hubo diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Tabla 3).

Los cuadrados medios del ANVA de las características agronómicas de rendimiento, número de espigas, número de granos y peso de 100 granos se muestran en la Tabla 4. Se aprecia que hubo diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para rendimiento de grano por planta en los dos tipos de riego limitado y normal. Para número de espigas por planta se encontró diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.01$ ) bajo riego limitado y diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) bajo riego normal u óptimo. Para número de granos por espiga-planta entre las líneas de trigo bajo riego limitado existe diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) y para riego normal hubo diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ). El análisis de varianza del peso de 100 granos bajo

riego limitado denotó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) y bajo riego normal mostró diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) (Tabla 4).

**a. Días a la antesis, días a la madurez, días de llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha**

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio de días a la antesis, días a la madurez, días de llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha, la prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) para tres genotipos de trigo harinero y t-Student entre los regímenes de riegos para el mismo genotipo. Las características señaladas muestran diferencias significativas en el riego limitado y el riego normal, a excepción del índice de cosecha en riego normal. Los valores de antesis para el riego limitado y óptimo coincidieron, sin embargo entre genotipos variaron de 42 a 54 días, siendo el genotipo más precoz G3 (42 días), seguido por G2 (48 días) y el más tardío G1 (54 días); valores medidos durante el riego diferenciado iniciado desde el espigado.

Los días a la madurez estuvieron entre 71 y 80 días en el ambiente riego limitado y entre 89 y 94 días en riego normal, observándose los valores más bajos en el ambiente riego limitado para los tres genotipos. El genotipo G3 fue el más precoz considerando a los días a la madurez en condiciones de riego limitado y el más tardío para riego normal. Los días a la madurez disminuyeron en un 10.6%, 11.5% y 24.9% para G1, G2 y G3; respectivamente (Tabla 5).

Los días de llenado de grano comprendidos entre antesis y madurez de la planta tuvieron valores promedio entre 25 y 32 para el riego óptimo, y 35 y 72 para el riego normal u óptimo. Bajo riego limitado, el genotipo G1 fue más corto el tiempo de llenado de grano con 25 días, seguido del G3 con 29 días, y G2 tuvo el más largo tiempo de llenado de grano con 32 días. En el caso de las plantas bajo riego óptimo, G2 tuvo el más corto tiempo con 35 días, seguido de G2 con 42 días, y G3 tuvo el más largo tiempo con 52 días. Los días de llenado de grano disminuyeron en 27.1%, 24.7% y 44.9%, respectivamente, siendo esta diferencia altamente significativa para los tres genotipos evaluados (Tabla 5).

Tabla 3. Cuadrados Medios del análisis de varianza y significancia de días a la antesis, días a la madurez, llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha de tres genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Días a la antesis	Días a la madurez		Llenado de grano		Altura de planta		Biomasa		Índice de cosecha	
			Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	648.0**	228.3**	72.33**	84.26**	684.3**	335.6**	356.8**	4.99**	8.97**	0.018**	0.002ns
Error	24	0.1	5	8.33	4.92	8.3	11	7.2	0.27	0.56	0.001	0.001
Error Típico de la Media		0.1	0.7	1.0	0.7	1.0	1.11	0.89	0.175	0.25	0.01	0.01

Nivel de significancia: “\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), “ns” no existen diferencias significativas.

Tabla 4. Cuadrados Medios del análisis de varianza y significancia de rendimiento y componentes de rendimiento de tres genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Rendimiento		Número de espigas / planta		Número de granos/planta		Peso de 100 Granos	
		Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	0.498**	1.804**	2.33**	1.04*	82.9*	161.8**	0.44*	0.736**
Error	24	0.067	0.161	0.22	0.21	15.5	19.3	0.083	0.045
Error Típico de la Media		0.086	0.134	0.157	0.154	1.3	1.5	0.096	0.071

Nivel de significancia: “\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Tabla 5. Promedios y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de días a la antesis, días a la madurez, llenado de grano, altura de planta, biomasa e índice de cosecha de tres genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Antesis (días)	Madurez (días)			Llenado de grano (días)			Altura Planta (cm)			Biomasa/planta (g)			Índice de cosecha/planta (%)		
		Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	54 c	80 a	89 b	-10.6**	25 c	35 c	-27.1**	73.1 a	75.1 a	-2.6	4.18 a	5.83 a	-28.3**	0.39 b	0.49 a	-18.8**
ERTH5-107 VM08 (G2)	48 b	80 a	90 b	-11.5**	32 a	42 b	-24.7**	61.3 b	63.3 b	-3.2 *	3.39 b	4.23 b	-19.8**	0.48 a	0.49 a	-1.6
ERTH4-117 VM08 (G3)	42 a	71 b	94 a	-24.9**	29 b	52 a	-44.9**	64.6 b	65.4 b	-1.3	2.69 c	4.0 b	-32.6**	0.46 a	0.51 a	-10.9**

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas. D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde R0: Riego limitado, R1: Riego normal u óptimo, y significancia de prueba de medias t-Student entre riego limitado y riego normal u óptimo donde: “\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Tabla 6. Promedios y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de rendimiento, número de espigas/planta, número de granos/planta, peso de 100 granos (g) de tres genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo dos regímenes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Rendimiento Planta (g)			Número espigas/planta			Número de granos/planta			Peso de 100 granos (g)		
	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	1.64 a	2.84 a	-42.2**	2.06 a	2.43 a	-15.5	43 a	47 a	-8.2	3.03 b	4.23 a	-28.4**
ERTH5-107 VM08 (G2)	1.64 a	2.07 b	-21.1**	1.87 a	2.19 ab	-14.7	39 ab	44 ab	-10.4*	3.45 a	3.76 b	-8.4*
ERTH4-117 VM08 (G3)	1.23 b	2.04 b	-39.9**	1.20 b	1.79 b	-32.9**	37 b	39 b	-3.4	3.12 ab	4.29 a	-27.3**

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas. D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde R0: Riego limitado, R1: Riego normal u óptimo, y significancia de prueba de medias t-Student entre riego limitado y riego normal u óptimo donde: “\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Abdolshahi *et al.* (2013) también encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza realizado a los días a la madurez y los días entre antesis y madurez. Además, Estrada-Campuzano *et al.* (2012) halló diferencias en la duración (días) desde la antesis a la madurez en variedades de triticale y trigo, refiriendo que el estrés hídrico acelera el desarrollo.

Para altura de planta los valores tuvieron un rango de 61.3 a 73.1 cm, corresponde el valor más bajo a G2 y el más alto a G1 en condiciones del riego limitado. Para el riego normal el rango varió de 63.3 a 75.1 cm, el menor valor fue observado G2 y el más alto en G1. Para esta característica los valores menores en los genotipos fueron observados en el ambiente riego limitado. La altura de planta se redujo en el riego limitado un 2.6%, 3.2% y 1.3% para G1, G2 y G3 respecto al óptimo, no siendo significativa la reducción en los genotipos G1 y G3.

Chandrasekar *et al.* (2000) encontraron un menor valor de la altura de planta en el tratamiento sometido a estrés hídrico respecto del tratamiento con riego normal, observando una reducción del 16.94% en el genotipo de trigo hexaploide susceptible y 9.65% en el genotipo tolerante por estrés hídrico. Taheri *et al.* (2011) coincide con lo encontrado.

En la Tabla 5 se presentan los valores de biomasa para los dos ambientes de riego y se observa que los menores valores para los tres genotipos corresponden al ambiente riego limitado. En el ambiente riego limitado el rango fue 2.69 a 4.18g con el valor más bajo en el G3 y el más alto G1. Por otro lado, las plantas con riego normal u óptimo tuvieron 4.00 a 5.83g de biomasa, correspondiendo el valor más bajo a G3 y el más alto a G1. Se encontró una reducción de 28.3%, 19.8% y 32.6% para G1, G2 y G3; respectivamente por efecto de estrés hídrico.

Chandrasekar *et al.* (2000), encontraron también una disminución de la biomasa en el tratamiento sometido a estrés hídrico comparado al tratamiento con riego normal en los genotipos de trigo hexaploide estudiados (genotipo susceptible a estrés hídrico 41.0% y genotipo tolerante de 32.2%), atribuyendo estos cambios al efecto del déficit hídrico en

procesos metabólicos importantes como la respuesta de varios mecanismos de defensa adoptados por las plantas bajo estrés hídrico. De forma similar, Mia *et al.* (2017) y Taheri *et al.* (2011) encontraron en el análisis de varianza de la biomasa diferencias significativas entre los tratamientos de estrés hídrico y riego normal. La menor variación entre tratamiento bajo estrés hídrico y el riego normal en valores medios de biomasa se considera como tolerancia a la sequía.

Comparando los valores medios de índice de cosecha, también se observa valores menores en plantas con riego limitado debido al estrés hídrico aplicado para los tres genotipos estudiados. El rango de índice de cosecha fue de 0.39 a 0.48 g/g y con el valor más bajo para G1 y el más alto para G2 en plantas bajo riego limitado. En las plantas bajo riego normal u óptimo el rango fue de 0.49 a 0.51 g/g, el valor más bajo se encontró en los genotipos G1 y G2, y el más alto en el genotipo G3. El índice de cosecha se redujo en las plantas bajo riego limitado en 18.8%, 1.6% y 10.9% en G1, G2 y G3 respectivamente, no siendo significativa la diferencia en G2.

El análisis de varianza de Taheri *et al.* (2011) mostró diferencias altamente significativas en el índice de cosecha solo entre genotipos de riego limitado, coincidiendo ello con los resultados para el ambiente riego limitado. Dado que el índice de cosecha muestra el porcentaje de transferencia de la materia orgánica producida de la fuente al reservorio, las líneas con mayor índice de cosecha fueron aquellas que transportan mayor cantidad de carbohidratos a los granos, que conllevó al incremento del rendimiento. En cambio, Ahmadizadeh *et al.* (2011) no obtuvieron diferencias significativas en el análisis de varianza del índice de cosecha para los ambientes evaluados. Considerando ello y siendo deseable tener el mayor índice de cosecha en el cultivo, el genotipo con la menor reducción o igualdad o incremento del índice de cosecha bajo condiciones de estrés en relación al índice de cosecha bajo condiciones de riego óptimas será considerado un genotipo óptimo para uso en programas de mejoramiento genético.

#### **b. Rendimiento y componentes de rendimiento**

En la Tabla 6 se aprecia valores medios de rendimiento de grano por planta en el ambiente riego limitado para los tres genotipos estudiados al compararlo con el ambiente riego normal. En el ambiente riego limitado el rango observado fue de 1.23 a 1.64 g por planta,

el valor más bajo estuvo en el genotipo G3 y el valor más alto en los genotipos G1 y G2. En el ambiente riego normal u óptimo el rango fue de 2.04 a 2.84 g por planta, el valor más bajo lo tuvo el genotipo G3 y el más alto el genotipo G1. Para rendimiento de grano por planta se obtuvo una reducción por efecto del estrés hídrico en los tres genotipos evaluados de 42.2%, 21.1% y 39.9% en G1, G2 y G3; respectivamente (Tabla 6).

Los resultados obtenidos para el rendimiento de las líneas de trigo estudiadas coinciden con lo reportado por Khakwani *et al.* (2012) y Mia *et al.* (2017), quienes hallaron una disminución significativa en el rendimiento de variedades de trigo sometidas a déficit hídrico, infiriendo que la menor fotosíntesis conlleva al declive del rendimiento en las variedades más susceptibles a la sequía. De igual manera Saeedipour y Moradi (2011) reportaron diferencias significativas entre las plantas de trigo regadas normalmente y las sometidas a estrés, siendo menor para las plantas sometidas a estrés hídrico, atribuyendo ello al efecto del estrés hídrico en los procesos de división celular, la reducción del número de células del endosperma que conllevan la reducción de la fuerza del reservorio formado por el grano.

En la Tabla 6 se presentan los valores de número de espigas /planta para los dos ambientes de riego y se observa que los menores valores para los tres genotipos corresponden al ambiente riego limitado. En el ambiente riego limitado el rango fue 1.20 a 2.06 espigas por planta con el valor más bajo en el genotipo G3 y el más alto en el genotipo G1. Por otro lado, en el ambiente riego normal el rango fue de 1.79 a 2.43 espigas por planta, correspondiendo el valor más bajo al genotipo G3 y el más alto al genotipo G1. Se encontró en las plantas bajo riego limitado una reducción de 15.5%, 14.7% y 32.9% en G1, G2 y G3 respecto a las plantas con riego normal u óptimo, no siendo significativa en G1 y G2.

De forma similar a los resultados obtenidos en el número de espigas por planta, Duggan *et al.* (2000) reportaron una disminución en el tratamiento bajo estrés hídrico en el número de espigas por metro cuadrado, que está relacionado con el número de espigas por planta, denotando esta variación como consecuencia del estrés hídrico que conlleva a la mortalidad de macollos. Mia *et al.* (2017), atribuyen esta mortalidad de macollos por planta también al estrés hídrico sometido. Por otro lado, Johari-Pireivatlou y Maralian

(2011) no encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza realizado al número de espigas. Por ello, la menor mortalidad de los macollos a causa del déficit hídrico sufrido por las plantas es favorable y considerada como tolerancia al estrés hídrico obteniendo menor disminución del número de espigas por planta.

Comparando los valores medios de número de granos/espiga, también se observa valores menores en el ambiente riego limitado debido al estrés hídrico aplicado para los tres genotipos estudiados. El rango fue de 37 a 43 de granos por espiga y con el valor más bajo para el genotipo G3 y el más alto para el genotipo G1 en el ambiente riego limitado. El rango de 39 a 47 granos/espiga se observó en el tratamiento riego normal y el valor más bajo fue hallado en el G3 y el más alto en el G1. El estrés hídrico redujo en 8.2%, 10.4% y 3.4% el número de granos por espiga en G1, G2 y G3 respecto a las plantas bajo riego normal u óptimo, no siendo significativa la diferencia en G1 y G3.

Johari-Pireivatlou y Maralian (2011) encontraron diferencias altamente significativas en el número de granos por espiga entre variedades de trigo sometidas a estrés hídrico y con riego normal. De modo similar el estudio de Foulkes *et al.* (2002) denota una reducción significativa en el número de granos por espiga en las plantas de trigo sometidas a estrés hídrico respecto a las plantas de trigo con riego normal de 2.9, 4.0 y 9.6 granos en los ensayos realizados en 1994, 1995 y 1996.

Para peso de 100 granos los valores tuvieron un rango de 3.03 a 3.45 g, corresponde el valor más bajo a G1 y el más alto a G2 en condiciones del riego limitado. Para el riego normal el rango varió de 3.76 a 4.29, el menor valor fue observado G2 y el más alto en G3. Para esta característica los valores menores en los genotipos fueron observados en el ambiente riego limitado. El peso de 100 granos se redujo en las plantas bajo riego limitado en 28.4%, 8.4% y 27.3% en G1, G2 y G3 respecto a las plantas con riego normal u óptimo por efecto del estrés hídrico (Tabla 6).

El resultado obtenido es semejante al obtenido por Johari-Pireivatlou y Maralian (2011) y Mia *et al.* (2017), quienes encontraron diferencias altamente significativas en el peso de 1000 granos entre los cultivares de trigo sometidos a estrés hídrico y con riego normal, indicando que se debe a la reducción de la capacidad de almacenamiento de los granos y a

la baja fuente de asimilados para el desarrollo de grano por bajo contenido de clorofila en la hoja bandera bajo condiciones de estrés hídrico. Por otro lado, Saleem (2003) estudió cuatro genotipos y encontró diferencias significativas en dos y no encontró diferencias significativas en los otros dos, evidenciando la alteración de la eficiencia de absorción de nutrientes.

#### **4.1.2 Características fisiológicas**

##### **a. Fotosíntesis**

En la tabla Tabla 7 se presentan los resultados del ANVA de los datos de fotosíntesis los cuales fueron evaluados al inicio del espigado, 14 días después del espigado (14 dde) y a los 33 días después del espigado (33 dde).

Para fotosíntesis 1 (espigado) no se observa diferencias estadísticas significativas para el ambiente riego limitado y si diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para riego normal. Para fotosíntesis 2 (14 dde) se aprecia diferencias altamente significativas para riego limitado ( $p < 0.01$ ) y diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para riego normal. El análisis de varianza de la fotosíntesis 3 (33 dde) denotó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) para riego limitado y diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para riego normal.

Los valores medios y la prueba de significancia Tukey ( $p < 0.05$ ) de las lecturas de fotosíntesis se presentan en la Tabla 8 y se puede apreciar diferencias significativas entre los valores de los genotipos para todas las observaciones realizadas a excepción de la evaluación de fotosíntesis 1 en el ambiente de riego limitado.

En fotosíntesis 1 (espigado) se observa un rango de 4.99 a 6.82  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  para riego limitado y corresponde el valor más bajo a G3 y el más alto a G1. Para riego normal el rango fue de 4.29 a 7.18  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  y el valor más bajo se observa en G3 y el más alto en G2. Observando el efecto del estrés hídrico en cada genotipo se puede apreciar un incremento para G1 (1.5%) y G3 (16.4%) y una disminución para G2 (-8.9%).

En la evaluación de fotosíntesis 2 (14 dde), se observa en general un incremento en el valor de fotosíntesis comparado con fotosíntesis 1 con excepción del G3 en riego limitado. El

rango para riego limitado fue igual a 4.36 a 10.77  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  y se aprecia que el valor más bajo es del G3 y el más alto de G1 y para riego normal el rango fue de 6.25 a 10.61  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  y con el valor más bajo para el G3 y el más alto par G1. En esta evaluación por efecto del estrés hídrico se encontró un incremento del valor de fotosíntesis de 1.5% para el G1 y una disminución de fotosíntesis de -11.9% para G2 y de -30.4% para G3.

Tabla 7. Cuadrados medios del ANVA de tres evaluaciones de fotosíntesis de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Fotosíntesis 1 (espigado)		Fotosíntesis 2 (14 dde)		Fotosíntesis 3 (33 dde)	
		Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	4.815ns	12.013**	53.885**	27.606*	0.0565*	54.981**
Error	12	2.414	1.216	5.7703	5.158	0.0085	0.4438
Error Típico de la Media		0.695	0.493	1.074	1.016	0.041	0.298

“dde”: días después de espigado. Nivel de significancia: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), “ns” no existen diferencias significativas.

Tabla 8. Promedios de fotosíntesis y Prueba de Significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) al inicio del espigado, a los 14 días del espigado y a los 33 días después del espigado en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Fotosíntesis 1 ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$ )			Fotosíntesis 2 ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$ )			Fotosíntesis 3 ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$ )		
	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	6.82 a	6.71 a	1.5	10.77 a	10.61 a	1.5	0.39 a	1.63 b	-76.0**
ERTH5-107 VM08 (G2)	6.54 a	7.18 a	-8.9	8.78 a	9.96 ab	-11.9	0.38 a	2.12 b	-81.9**
ERTH4-117 VM08 (G3)	4.99 a	4.29 b	16.4	4.36 b	6.25 b	-30.4	0.2 b	7.6 a	-97.3**

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde  $R_0$ : Riego limitado,  $R_1$ : Riego normal u óptimo, y prueba de medias t-Student donde: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Para fotosíntesis 3 (33 dde) se aprecia una disminución muy alta de los valores medios comparados a las lecturas anteriores para los tres genotipos evaluados y para los dos ambientes de riego a excepción de G3 en el ambiente riego normal. Para riego limitado el rango fue de 0.2 a 0.39  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  y con el valor más bajo en G3 y el más alto en G1.

Para riego normal el rango fue igual a 1.63 a 7.6  $\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$  y el valor más bajo en G1 y el más alto en G3. El efecto del estrés hídrico reduce en los tres genotipos el valor de la fotosíntesis en -76.0%, -81.9% y -97.3% para G1, G2 y G3; respectivamente.

De forma similar Saeedipour y Moradi (2011) observaron una reducción de la tasa de fotosíntesis progresiva, moderada para ambas variedades estudiadas bajo riego óptimo y la variedad tolerante con riego limitado, en cambio esta reducción fue drástica en la variedad susceptible a la sequía con riego limitado, relacionando ello a la senescencia que conlleva el estrés hídrico. Malik *et al.* (1999) también encontró que los genotipos tolerantes a la sequía y sus cruces presentan valores más altos de fotosíntesis que los genotipos susceptibles, denotando la herencia de la característica evidenciada por los valores registrados. Considerando ello, se infiere que los genotipos G1 y G2 tienen tolerancia al estrés hídrico sometido, y G3 presenta susceptibilidad al estrés hídrico sometido y senescencia más rápida comparada con los otros.

#### **b. Clorofila**

La clorofila se midió en tres fechas en los dos ambientes de riego. En el inicio de espigado (clorofila 1) a los 10 días después del espigado (10 dde) y a los 20 días después del espigado (20 dde). Los resultados del ANVA para las tres lecturas de clorofila se presentan en la Tabla 9.

Para clorofila 1 (espigado) se observa diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para el ambiente riego limitado y para riego normal. Para clorofila 2 (10 dde) se aprecia diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en riego limitado y no se aprecia diferencias significativas en riego normal. El análisis de varianza de la clorofila 3 (20 dde) denotó diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para riego limitado y diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para riego normal.

En la Tabla 10 se presentan los valores medios y la prueba de significancia Tukey ( $p < 0.05$ ) de las tres lecturas de clorofila y se puede apreciar diferencias significativas entre los valores de los genotipos para todas las observaciones realizadas a excepción de la evaluación de fotosíntesis 2 en el ambiente de riego normal.

En clorofila 1 (espigado) se observa un rango de 45.6 a 50.2 SPAD para riego limitado y corresponde el valor más bajo a G2 y el más alto a G1. Para riego normal el rango fue de 45.6 a 50.2 y el valor más bajo se observa en G2 y el más alto G1. Observando el efecto del estrés hídrico en cada genotipo se puede apreciar un incremento para G1 (0.1%) y G3 (0.9%) y una disminución para G2 (-0.1%).

Tabla 9. Cuadrados medios del ANVA de tres evaluaciones de clorofila de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Clorofila 1 (espigado)		Clorofila 2 (10 dde)		Clorofila 3 (20 dde)	
		Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	51.02**	51.39**	23.46*	12.81ns	341.46**	58.67*
Error	24	6.53	3.16	6.94	4.89	19.9	10.63

Error Típico de la Media	0.85	0.59	0.88	0.74	1.5	1.09
--------------------------	------	------	------	------	-----	------

“dde”: días después de espigado. Nivel de significancia: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), “ns” no existen diferencias significativas.

Tabla 10. Promedios de clorofila y Prueba de Significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) al inicio del espigado, a los 10 días del espigado y a los 20 días después del espigado en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Clorofila 1 (SPAD) <sup>1</sup>			Clorofila 2 (SPAD) <sup>1</sup>			Clorofila 3 (SPAD) <sup>1</sup>		
	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	50.2 a	50.2 a	0.1 ns	49 b	50.5 a	-3 ns	40.6 b	48.6 b	-16.4 *
ERTH5-107 VM08 (G2)	45.6 b	45.6 b	-0.1 ns	52.2 ab	52.9 a	-1.2 ns	52.1 a	51.9 ab	0.4 ns
ERTH4-117 VM08 (G3)	47 b	46.6 b	0.9 ns	50.4 a	51.3 a	-1.7 ns	50.1 a	53.6 a	-6.3 *

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). “<sup>1</sup>”: Las mediciones de clorofila se hicieron en unidades SPAD con el equipo TPS-2 Portable Photosynthesis System. “D”: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde  $R_0$ : Riego limitado,  $R_1$ : Riego normal u óptimo; y grado de significancia de la diferencia obtenida con la prueba de t-Student: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), “ns” diferencia no significativa ( $p > 0.05$ ).

En la evaluación de clorofila 2 (10 dde), se encontró un rango para riego limitado igual a 49 a 52.2 SPAD y se aprecia que el valor más bajo es del G1 y el más alto de G2 y para riego normal el rango fue de 50.5 a 52.9 SPAD y con el valor más bajo para el G1 y el más alto para G2. En esta evaluación por efecto del estrés hídrico se encontró una disminución de fotosíntesis de -3%, -1.2% y -1.7% para G1, G2 y G3; respectivamente.

Para clorofila 3 (20 dde), para riego limitado el rango fue de 40.6 a 52.1 SPAD y con el valor más bajo en G1 y el más alto en G2. Para riego normal el rango fue igual a 48.6 a 53.6 SPAD y el valor más bajo en G1 y el más alto en G3. El efecto del estrés hídrico reduce en los genotipos G1 y G3 el valor de la clorofila en -16.4% y -6.3%; respectivamente, e incrementa en 0.4% para G2.

A diferencia de lo obtenido, Mia *et al.* (2017) encuentra diferencias significativas en el contenido de clorofila entre tratamientos de riego en los primeros días de aplicado el estrés hídrico luego de la fase de antesis, relacionando lo obtenido a la movilización de los metabolitos de las hojas y tallos hacia los granos en desarrollo causando una pérdida de la clorofila en las hojas. Por otro lado, Ahmadi-Lahijani y Emam (2016) observaron también una disminución del contenido de clorofila en diferente grado en los 25 cultivares estudiados, sin embargo denotaron que el permanecer verdes pese al estrés hídrico durante el periodo post antesis constituye un criterio de selección eficiente de plantas con tolerancia a la sequía, dado que en general el estrés hídrico conlleva a acelerar la degradación de la clorofila y provocar la senescencia en los genotipos de trigo. Por lo mencionado, en el estudio realizado se infiere que la línea G2 y la línea G3, con el mayor contenido de clorofila, tienden a permanecer verdes mayor tiempo para que la planta realice síntesis de fotosintatos.

### **c. Agua transpirada y Eficiencia de Uso del Agua (EUA)**

Los resultados del ANVA para las observaciones realizadas para agua transpirada y eficiencia de uso de agua se presentan en la Tabla 11.

Para agua transpirada desde el espigado de las plantas se observa diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para el ambiente riego limitado y para riego normal. El análisis de varianza de eficiencia de uso de agua denotó diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para riego limitado y riego normal.

En la Tabla 12 se presentan los valores medios y la prueba de significancia Tukey ( $p < 0.05$ ) de agua transpirada desde el espigado y eficiencia de uso de agua. Se puede apreciar diferencias significativas entre los valores de los genotipos para todas las observaciones

realizadas en los ambientes de riego.

Tabla 11. Cuadrados medios del ANVA de agua transpirada desde espigado y eficiencia de uso de agua de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Agua Transpirada desde espigado		EUA	
		Riego limitado	Riego normal	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	15637 **	16276**	2.38 **	5.89**
Error	24	1181	2492	0.56	0.38

Error Típico de la Media	11	17	0.25	0.21
--------------------------	----	----	------	------

Nivel de significancia: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ).

El agua transpirada desde el espigado tiene valores más altos en el ambiente riego normal en los tres genotipos comparado con el riego limitado. Para riego limitado se encontró un rango de 155 a 239 ml y corresponde el valor más bajo a G3 y el más alto a G2. En el caso de los genotipos con riego normal el rango fue de 303 a 384 ml y el valor más bajo se observa en G3 y el más alto G2. Observando el efecto del estrés hídrico en cada genotipo se puede apreciar una reducción para G1, G2 y G3 de -47%, -38% y -49%; respectivamente (Tabla 12).

Tabla 12. Promedios de agua transpirada desde espigado (ml) y eficiencia de uso de agua (g/L) y Prueba de Significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Agua Transpirada desde espigado (ml)			Eficiencia de Uso de Agua (g/L)		
	Riego limitado	Riego normal	D (%)	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	195 b	367 a	-47**	4.7 ab	5.3 a	-11.4ns
ERTH5-107 VM08 (G2)	239 a	384 a	-38**	4.5 b	3.9 b	15.0ns
ERTH4-117 VM08 (G3)	155b	303 b	-49**	5.5. a	5.3 a	2.3ns

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde  $R_0$ : Riego limitado,  $R_1$ : Riego normal u óptimo; y grado de significancia de la diferencia obtenida con la prueba de t-Student: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ), “ns” no existen diferencias significativas.

De forma similar a lo obtenido, Ahmadi-Lahijani y Emam (2016) y Zhang *et al.* (1998) observaron una reducción significativa en la transpiración de los genotipos sometidos a estrés hídrico. Esta reducción en la transpiración es la consecuencia del cierre estomático, la resistencia estomática conlleva a mejorar la eficiencia de uso de agua del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico (Mahpara *et al.* 2014).

En el caso de la eficiencia de uso de agua (EUA), en el riego limitado el rango fue de 4.5 a 5.5 g/L y con el valor más bajo en G2 y el más alto en G3. En el riego normal el rango fue igual a 3.9 a 5.3 g/L y el valor más bajo en G2 y el más alto en G1 y G3. El efecto del estrés hídrico incremento el valor de EUA en los genotipos G2 y G3 con valores iguales a 15.0% y 2.3% respectivamente, en el caso de G1 disminuyó en -11.4% (Tabla 12).

Misra *et al.* (2010) también observaron que la eficiencia de uso de agua obtenida por la planta es mayor bajo disponibilidad limitada de agua en comparación a una planta con disponibilidad óptima de agua. Sin embargo, Ahmadi-Lahijani y Emam (2016) manifestaron que plantas bajo condiciones de riego óptimo mostraron eficiencia de uso de agua mayor que en el caso de las sometidas a estrés hídrico. La diferencia encontrada de la eficiencia de uso de agua se relaciona con posible menor área foliar y menor conductancia estomática que conlleva a una menor tasa de transpiración, y por tanto un valor mayor de eficiencia de uso de agua por plantas bajo estrés hídrico.

#### **d. Contenido Relativo de Agua (CRA)**

Los resultados del ANVA para las observaciones realizadas para el contenido relativo de agua se presentan en la Tabla 13. Para CRA- Inicial al iniciar la aplicación de diferentes riegos no se observa diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Para CRA cosecha no se aprecia diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para riego limitado y si se observan diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para riego normal.

En la Tabla 14 se presentan los valores medios y la prueba de significancia Tukey ( $p < 0.05$ ) de el contenido relativo de agua (CRA). Se obtuvo diferencias significativas entre los valores de los genotipos solo para el CRA en la cosecha en el ambiente riego normal.

Tabla 13. Cuadrados medios del ANVA del contenido relativo de agua (CRA) de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	CRA (g/g)	CRA en cosecha (g/g)	
		Al iniciar el riego diferenciado	Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	0.005	20.6	1127**
Error	12	0.01	5.9	20.9
Error Típico de la Media		0.044	1.083	2.05

Nivel de significancia: "\*\*\*" diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), "\*\*" diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

En CRA inicial tomado al inicio del riego diferenciado tuvo un rango de 0.76 a 0.82 g/g, donde el valor más bajo correspondió al genotipo G2 y el más alto al genotipo G1. Para el CRA en la cosecha, se observó un rango de 7.1 a 10.9 g/g para riego limitado y el valor más bajo se observó en G3 y el más alto G2. Para riego normal el rango fue de 11.4 a 38.6 g/g, encontrándose el valor más bajo en el G3 y el más alto en G1. Observando el efecto del estrés hídrico en cada genotipo se pudo apreciar una reducción para G1, G2 y G3 de -79.6%, -21.6% y -38.2%; respectivamente.

Tabla 14. Promedios del contenido relativo de agua (CRA) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	CRA (g/g)	CRA en Cosecha (g/g)		
	Al iniciar el riego diferenciado	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	0.82 a	7.9 a	38.6 a	-79.6**
ERTH5-107 VM08 (G2)	0.76 a	10.9 a	13.9 b	-21.6
ERTH4-117 VM08 (G3)	0.81 a	7.1 a	11.4 c	-38.2

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde  $R_0$ : Riego limitado,  $R_1$ : Riego normal u óptimo; y grado de significancia de la diferencia obtenida con la prueba de t-Student: "\*\*\*" diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), "\*\*" diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

De forma similar, Chandrasekar *et al.* (2000), Tambussi y Nogués (2005) y Ali *et al.* (2019) encontraron un declive evidente en el contenido relativo de agua (CRA) de las hojas de genotipos de trigo bajo sequía en contraste a los sometidos a riego óptimo. El contenido

relativo de agua es una condición fisiológica para evaluar la hidratación en tejidos y células de la planta en relación a permitir un normal crecimiento y desarrollo de la planta, y por ello la preservación de un alto CRA durante la sequía se considera un indicativo de tolerancia a la sequía.

### 4.1.3 Características bioquímicas

#### a. Proteína grano (%)

En la Tabla 15 se presentan los datos del ANVA para proteína de granos realizadas en esta investigación. Se puede apreciar que existe solo diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) para proteína en el ambiente riego limitado.

Los valores medios de proteína de grano se presentan en la Tabla 16 y varían de 14.7 a 15.8% en el ambiente riego limitado y con el valor más bajo para G3 y el valor más alto para G1. Para el ambiente riego normal el rango fue igual a 15.1 a 15.2, observándose el valor más bajo en G3 y el más alto en G1 y G2. El efecto del estrés hídrico muestra un incremento en el contenido de proteína de 3.92 para G1 y de 0.44 para G2 y una disminución de -2.91% para G3.

Tabla 15. Cuadrados medios del ANVA del contenido proteína de grano de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Proteína	
		Riego limitado	Riego normal
Genotipos	2	3.029**	0.037
Error	24	0.17	0.097
Error Típico de la Media		0.138	0.104

Nivel de significancia: “\*\*\*” diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), “\*\*” diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

De forma similar, Saint-Pierre *et al.* (2008), Li *et al.* (2011) y Ali *et al.* (2019) encontraron diferencias significativas en el contenido de proteína del grano entre genotipos de trigo sometidos a estrés hídrico y los sometidos a riego óptimo, con incremento de la proteína en los sometidos a estrés hídrico. Sin embargo, el incremento del contenido de proteína se ve asociado con la disminución del rendimiento de grano bajo condiciones de estrés, es por ello que se considera un reto para los mejoradores lograr obtener una planta que tenga

valores altos de contenido proteico como de rendimiento de grano.

Tabla 16. Promedios del contenido de proteína (%) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Proteína de Grano (%)		
	Riego limitado	Riego normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	15.8 a	15.2 a	3.92*
ERTH5-107 VM08 (G2)	15.3 b	15.2 a	0.44
ERTH4-117 VM08 (G3)	14.7 c	15.1 a	-2.91**

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). D: Diferencia porcentual del riego limitado respecto del riego óptimo obtenido de la fórmula  $100\% \cdot (R_0 - R_1) / R_1$ , donde  $R_0$ : Riego limitado,  $R_1$ : Riego normal u óptimo; y grado de significancia de la diferencia obtenida con la prueba de t-Student: "\*\*\*" diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), "\*\*" diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

#### b. Prolina ( $\mu\text{mol/g}$ )

Para prolina los resultados el ANVA se presentan en la Tabla 17 y se observan diferencias altamente significativas en el ambiente riego limitado y en el de riego normal.

Tabla 17. Cuadrados medios del ANVA del contenido prolina de tres genotipos de trigo harinero (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Fuente	GL	Prolina	
		Riego limitado	Riego Normal
Genotipos	2	16008.6**	5809.5**
Error	9	61.8	31.7
Error Típico de la Media		3.93	2.81

Nivel de significancia: "\*\*\*" diferencia altamente significativa ( $p < 0.01$ ), "\*\*" diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

En la Tabla 18 se presentan los valores medios de prolina observados en los dos ambientes de estudio. Para riego limitado el rango fue igual a 2.3 a 117.1  $\mu\text{mol/g}$  y con el valor más bajo para G2 y el más alto para G3. Para el ambiente riego normal se encontró un rango de 0.5 a 66.6  $\mu\text{mol/g}$ , observándose el valor más bajo para G1 y el más alto par G3. El efecto del estrés hídrico muestra un incremento significativo en la cantidad de prolina detectada en el ambiente riego limitado para G1, G2 y G3 de 2640%, 296 % y 76% comparada con la

cantidad de prolina obtenida bajo riego normal.

Tabla 18. Promedios del contenido de prolina (umol/g) y prueba de significación Tukey ( $p < 0.05$ ) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego en condiciones de La Molina.

Genotipos	Prolina (umol/g)		
	Riego limitado	Riego Normal	D (%)
PITH-23 LM08B (G1)	13.7 a	0.5 a	2640**
ERTH5-107 VM08 (G2)	2.3 a	0.6 a	296**
ERTH4-117 VM08 (G3)	117.1 b	66.6 b	76**

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). D: Valores porcentuales resultado de la fórmula  $100\% \cdot (R0 - R1) / R1$ , donde R0: Riego limitado, R1: Riego normal u óptimo.

Del mismo modo, Johari- Pireivatlou (2010) y Ali *et al.* (2019) encontraron un incremento significativo en el contenido de prolina de las hojas de genotipos de trigo sometidos a estrés hídrico respecto a los sometidos a riego óptimo. El incremento de prolina es una respuesta de la planta favorable para proteger las membranas de la oxidación en lugar de la regulación osmótica ante el estrés hídrico, y de esta forma mantener su estructura y desarrollo normal de la planta (Tatar y Gevrek, 2008).

#### 4.2 IDENTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS, FISIOLÓGICAS Y BIOQUÍMICAS

La correlación entre las características agronómicas de tres líneas avanzadas de trigo bajo riego limitado y riego normal se muestran en la Tabla 19. Se observó que el rendimiento bajo estrés hídrico tuvo una correlación positiva fuerte con biomasa (0.82); la biomasa bajo riego limitado tuvo correlación positiva fuerte con el número de espigas (0.84) y el número de granos (0.81). Bajo riego óptimo, se observó correlación positiva fuerte del rendimiento con altura de planta (0.81) y biomasa (0.97); de la misma forma la biomasa tuvo correlación positiva fuerte con la altura de planta (0.86); por otro lado, el número de días de llenado de grano tuvo correlación positiva fuerte con el número de días a la madurez (0.86), y correlación negativa fuerte con el número de días a la antesis (-0.93). En ambos tratamientos de riego, limitado y óptimo, el índice de cosecha y el peso de 100 granos no tuvieron correlación fuerte con alguna característica agronómica.

Tabla 19. Coeficientes de correlación entre características agronómicas determinadas para tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.

	Rendimiento	Antesis	Maduración	Llenado de grano	Altura	Biomasa	Índice de cosecha	Número de espigas	Número de granos	Peso de 100 granos
Rendimiento		0.62	-0.24	-0.51	0.81**	0.97**	0.08	0.73	0.65	0.19
Antesis	0.52		-0.60	-0.93**	0.69	0.70	-0.33	0.53	0.64	-0.07
Maduración	0.74	0.77		0.86**	-0.36	-0.36	0.50	-0.28	-0.55	0.20
Llenado de grano	0.26	-0.42	0.26		-0.61	-0.62	0.45	-0.47	-0.67	0.14
Altura	0.31	0.59	0.24	-0.55		0.86**	-0.21	0.57	0.64	0.33
Biomasa	0.82**	0.77	0.75	-0.10	0.63		-0.18	0.80	0.75	0.16
Índice de cosecha	0.16	-0.56	-0.12	0.66	-0.61	-0.41		-0.34	-0.46	0.12
Número de espigas	0.72	0.72	0.76	-0.01	0.40	0.84**	-0.32		0.76	-0.14
Número de granos	0.61	0.54	0.52	-0.09	0.62	0.81**	-0.39	0.57		-0.13
Peso de 100 granos	0.43	-0.13	0.32	0.66	-0.24	0.11	0.51	0.15	0.08	

Los valores sobre las casillas gris en diagonal corresponden a coeficientes de correlación bajo riego óptimo, los valores bajo las casillas gris en diagonal corresponden a coeficientes de correlación bajo riego limitado. Los valores cercanos a 1 indican asociación positiva, los valores cercanos a -1 indican asociación negativa, y los valores cercanos a 0 indican que no hay asociación entre las variables (Galbiati, 2007). “\*\*\*”: Correlación fuerte (Nieves y Domínguez, 2009) con p-value <0.01, sombreados en rojo.

De forma similar a lo obtenido, Ahmadizadeh *et al.* (2011) encontraron correlación positiva entre el rendimiento y la biomasa en cultivos bajo estrés hídrico y riego óptimo, recomendando se considere la biomasa total en programas de mejoramiento para asegurar la mejora en el rendimiento por largo periodo. También Mia *et al.* (2017) encontraron resultados similares a los obtenidos, denotando una correlación positiva entre el número de granos por planta y la biomasa en plantas bajo estrés hídrico y riego óptimo, coincidiendo con los resultados obtenidos para las plantas bajo riego limitado. Johari-Pireivatlou y Maralian (2011) encontraron correlación positiva del rendimiento de grano con la altura de planta (0.728), similar a lo obtenido en el tratamiento de riego óptimo.

La correlación de las características fisiológicas y bioquímicas con las agronómicas bajo riego limitado se presentan en la Tabla 20. Se observó que la fotosíntesis (14 dde) bajo riego limitado tuvo una correlación fuerte positiva con el número de días a la antesis (0.81); y el contenido de proteína tuvo correlación positiva fuerte con la biomasa (0.85) y número de espigas por planta (0.81). Bajo riego limitado, las características fisiológicas de fotosíntesis a los 33 dde, el contenido de clorofila a los 10 dde y 20 dde, el agua transpirada desde espigado, eficiencia de uso de agua en términos de rendimiento y el contenido relativo de agua en la cosecha no se encontró alguna correlación fuerte con las características agronómicas estudiadas.

Tabla 20. Coeficientes de correlación de características fisiológicas y bioquímicas con las características agronómicas determinadas para tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) bajo ambiente de riego limitado en condiciones de La Molina.

	Rendimiento	Antesis	Maduración	Llenado de grano	Altura	Biomasa	Índice de cosecha	Número de espigas	Número de granos	Peso de 100 granos
Fotosíntesis (14 dde)	0.51	0.81**	0.59	-0.50	0.52	0.61	-0.38	0.52	0.64	-0.37
Fotosíntesis (33 dde)	0.63	0.77	0.68	-0.29	0.35	0.75	-0.42	0.79	0.53	0.16
Clorofila (10 dde)	0.35	0.06	0.50	0.63	-0.30	0.10	0.49	0.22	0.07	0.62
Clorofila (20 dde)	-0.36	-0.42	-0.07	0.51	-0.75	-0.62	0.68	-0.38	-0.54	0.30
Agua transpirada en prueba	0.74	0.35	0.79	0.58	-0.06	0.63	0.14	0.69	0.45	0.49
EUA por rendimiento	0.25	-0.42	-0.40	0.06	0.17	0.01	0.38	-0.20	0.12	0.21
CRA en cosecha	0.31	0.13	0.35	0.30	-0.06	0.12	0.35	0.38	0.27	0.45
Proteína	0.61	0.78	0.60	-0.32	0.54	0.85**	-0.49	0.81**	0.69	-0.09

Los valores cercanos a 1 indican asociación positiva, los valores cercanos a -1 indican asociación negativa, y los valores cercanos a 0 indican que no hay asociación entre las variables (Galbiati, 2007). “\*\*\*”: Correlación fuerte ( $p < 0.01$ ), sombreados en rojo.

La correlación de las características fisiológicas y bioquímicas con las agronómicas bajo riego óptimo se presentan en la Tabla 21. Se observó que la fotosíntesis (33 dde) bajo riego óptimo tuvo una correlación fuerte negativa el número de días a la antesis (0.87); y el contenido relativo de agua en cosecha tuvo correlación positiva fuerte con el rendimiento (0.83), con el número de días a la antesis (0.84), con la altura de planta (0.92) y con la

biomasa (0.87). Bajo riego óptimo, las características fisiológicas de fotosíntesis a los 14 dde, el contenido de clorofila a los 10 dde y 20 dde, el agua transpirada en prueba, eficiencia de uso de agua en términos de rendimiento no tuvieron alguna correlación fuerte con las características agronómicas estudiadas; de forma similar, la característica bioquímica de contenido de proteína no presentó alguna correlación fuerte con las características agronómicas estudiadas.

Tabla 21. Coeficientes de correlación de características fisiológicas y bioquímicas con las características agronómicas para tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) bajo ambiente de riego óptimo en condiciones de La Molina.

	Rendimiento	Antesis	Maduración	Llenado de grano	Altura	Biomasa	Índice de cosecha	Número de espigas	Número de granos	Peso de 100 granos
<b>Fotosíntesis (14 dde)</b>	0.44	0.71	0.09	-0.42	0.27	0.45	0.02	0.39	0.38	-0.15
<b>Fotosíntesis (33 dde)</b>	-0.55	-0.87**	0.26	0.72	-0.36	-0.62	0.22	-0.70	-0.71	0.36
<b>Clorofila (10 dde)</b>	-0.36	-0.33	-0.16	0.13	-0.37	-0.28	-0.33	-0.03	0.09	0.14
<b>Clorofila (20 dde)</b>	-0.37	-0.61	-0.18	0.31	-0.47	-0.34	-0.15	-0.12	0.10	0.19
<b>Agua transpirada en prueba</b>	0.60	0.44	-0.37	-0.46	0.32	0.64	-0.23	0.79	0.63	-0.23
<b>EUA</b>	0.63	-0.03	0.28	0.15	0.53	0.52	0.40	0.20	0.14	0.48
<b>CRA en cosecha</b>	0.83**	0.84**	-0.20	-0.67	0.92**	0.87**	0.01	0.65	0.66	0.24
<b>Proteína</b>	0.30	0.18	-0.14	-0.19	0.12	0.32	-0.07	0.31	0.30	0.10

Los valores cercanos a 1 indican asociación positiva, los valores cercanos a -1 indican asociación negativa, y los valores cercanos a 0 indican que no hay asociación entre las variables (Galbiati, 2007). “\*\*\*”: Correlación fuerte (Nieves y Domínguez, 2009) con p-value < 0.01.

Ahmadi-Lahijani y Emam (2016) encontraron correlación positiva significativa entre la tasa de transpiración y el rendimiento para ambos tratamientos de riego (0.63 y 0.72), coincidiendo con los resultados obtenidos, adicionalmente en las plantas bajo riego limitado no encontraron correlación de la eficiencia de uso de agua (EUA) con el rendimiento coincidiendo con lo obtenido, sin embargo, encontraron correlación positiva significativa de contenido de clorofila con el rendimiento, que en lo obtenido no hubo correlación alguna en ambos tratamientos de riego. Ali *et al.* (2019) encontraron correlación positiva fuerte entre del contenido relativo de agua (CRA) con la biomasa en

las plantas bajo estrés hídrico (0.796\*\*) coincidiendo con lo obtenido en el presente estudio, sin embargo, para Ali *et al.* (2019) la correlación negativa entre la biomasa y la proteína del grano (-0.415) no fue significativa bajo condiciones de estrés, siendo contrario a lo obtenido, al encontrar correlación fuerte positiva entre la proteína y biomasa bajo condiciones de estrés. Adicionalmente, Ali *et al.* (2019) no encontraron correlación significativa del contenido de clorofila con la biomasa bajo condiciones de estrés hídrico y condiciones óptimas de riego, coincidiendo con lo obtenido.

#### **4.3 DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE TRIGO PARA MEJORAMIENTO DE VARIEDADES CON TOLERANCIA A LA SEQUÍA**

Se seleccionaron los índices de tolerancia y susceptibilidad al estrés que figuran en la Tabla 22. El índice de Intensidad de Estrés (SI) obtenido fue 0.35, categorizado como **estrés moderado**.

Considerando los indicadores de la clase I donde los valores altos son los deseables, la línea PITH-23 LM08B (G1) tuvo los más altos valores para MP (2.24), GMP (2.16) y STI (0.87) relacionados al rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, luego estuvo la línea EARTH5-107 VM08 (G2: 1.86, 1.84 y 0.63), y finalmente la línea EARTH4-117 VM08 (G3:1.64, 1.58, 0.47) que tuvo los menores valores para MP, GMP y STI relacionados al rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico. Para los indicadores de la clase II los valores bajos son los deseables, la línea EARTH5-107 VM08 (G2) tuvo los más bajos valores para reducción del rendimiento respecto al tratamiento con riego óptimo de (21%), TOL (0.43) y SSI (0.59), y fue considerada una línea avanzada tolerante al estrés hídrico en la fase de espigado y llenado de grano por poseer un SSI<1; luego se tuvo a las líneas PITH-23 LM08B (G1) y EARTH4-117 VM08 (G3) con reducción del rendimiento de 42% y 40%, TOL de 1.20 y 0.81, y SSI de 1.20 y 1.13, respectivamente, teniendo mayor sensibilidad a la falta de agua y se consideraron líneas avanzadas susceptibles por poseer un SSI>1.

De manera similar, Patel *et al.* (2019) evaluaron la producción geométrica media (GMP) y el índice de tolerancia a la sequía (STI) en 15 genotipos donde determinaron que valores de

STI>0.60 tienen mayor tolerancia al estrés y rendimiento potencial, identificando los genotipos que rinden favorablemente bajo ambos tratamientos de riego, limitado y óptimo, además afirmaron que el índice de tolerancia al estrés (TOL) fue mayor cuando se tuvo mayor pérdida del rendimiento bajo estrés y mayor sensibilidad a la falta de agua.

Dada la necesidad de integrar los indicadores en un solo valor, se halló el índice de puntuación múltiple (MSI) señalado en la Tabla 22. A través del MSI se determinó a la línea de trigo ERTH5-107 VM08 (G2) como “mejor genotipo” para ser empleado en programas de mejoramiento entre las líneas estudiadas, obteniendo MSI de 4.2 bajo condiciones de estrés moderado (SI=0.35), seguida de las líneas PITH-23 LM08B (G1) y ERTH4-117 VM08 (G3) que tuvieron valores de 4.6 y 8.8, respectivamente. El rendimiento obtenido bajo estrés hídrico tuvo correlación de Pearson con el MSI ( $r=-1.0$ ,  $p=0.05$ ), y el indicador STI tuvo correlación positiva significativa con MP y GMP con  $r=1.0$ ,  $p<0.05$  para ambos casos (Anexo 4).

De forma similar, Mohammadi (2019) y Ahakpaz *et al.* (2020) consideraron a los genotipos con MSI más cercanos a 1 dentro de los estudiados como la mejor combinación de alta productividad y alta tolerancia a condiciones moderadas de estrés hídrico.

Tabla 22. Producción media (MP), producción geométrica media (GMP) e índices obtenidos en tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.

Genotipos	Yp	Yd	Red (%)	Clase I			Clase II		MSI
				MP	GMP	STI	TOL	SSI	
PITH-23 LM08B (G1)	2.84a	1.64a	42	2.24	2.16	<b>0.87</b>	1.20	1.20	4.6
ERTH5-107 VM08 (G2)	2.07b	1.64a	<b>21</b>	1.86	1.84	0.63	0.43	<b>0.59</b>	<b>4.2</b>
ERTH4-117 VM08 (G3)	2.04b	1.23b	40	1.64	1.58	0.47	0.81	1.13	8.8

Promedios con la misma letra en la misma columna no tienen diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p<0.05$ ). Yp: rendimiento de grano bajo riego óptimo, Yd: rendimiento de grano bajo riego limitado, Red: reducción de rendimiento resultado de la fórmula  $100\%*(Yp-Yd)/Yp$ , MP: productividad media, GMP: productividad geométrica media, STI: índice de tolerancia al estrés, TOL: índice de tolerancia, SSI: índice de susceptibilidad al estrés, MSI: índice de puntuación múltiple.

La eficiencia de la tolerancia a la sequía (DTE) y el índice de estabilidad del rendimiento (YSI) se muestran en la Tabla 23, donde el genotipo ERTH5-107 VM08 (G2) presentó el

mayor valor (79% y 0.79), y los genotipos ERT4-117 VM08 (G3) y PITH-23 LM08B (G1) tuvieron los menores valores con DTE de 60% y 58%, y YSI de 0.60 y 0.58; respectivamente.

Tabla 23. Eficiencia de la tolerancia a la sequía e índice de estabilidad del rendimiento (YSI) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.

<b>Genotipos</b>	<b>DTE (%)</b>	<b>YSI (g/g)</b>
PITH-23 LM08B (G1)	58	0.58
ERTH5-107 VM08 (G2)	79	0.79
ERTH4-117 VM08 (G3)	60	0.60

DTE: eficiencia de la tolerancia a la sequía, YSI: índice de estabilidad del rendimiento.

De forma similar, Bahar y Yildirim (2010) concluyeron que el genotipo con más alto DTE tuvo mayor tolerancia a la sequía, y encontraron correlación negativa fuerte entre DTE y SSI.

## V. CONCLUSIONES

- La evaluación de las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas permitió identificar el valor de la determinación del rendimiento de grano, días de llenado de grano, transpiración y contenido de prolina para estudios de tolerancia al estrés hídrico e identificación de genotipos con diferentes niveles de respuesta al estrés hídrico.
- La relación entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas en plantas de “trigo harinero” bajo estrés hídrico mostró la existencia de una correlación de Pearson positiva fuerte entre el rendimiento y la biomasa.
- Se determinó al índice de puntuación múltiple (MSI) como el más útil para identificar al “mejor genotipo” con tolerancia al estrés hídrico para ser empleado en programas de mejoramiento en este estudio.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda tomar mediciones de características bioquímicas de prolina antes, durante y al final del riego diferenciado para determinar su variación.
- Se sugiere hallar el índice de puntuación múltiple en trabajos con mayor cantidad de líneas avanzadas de trigo empleadas en programas de mejoramiento genético.
- Se recomienda realizar la caracterización molecular de los genotipos y asociar los indicadores estudiados a marcadores polimórficos.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdolshahi, R; Safarian, A; Nazari M; Pourseyedi, S; Mohamadi-Nejad, G. 2013. Screening drought-tolerant genotypes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using different multivariate methods. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59(5):685-704.
- Acevedo, EH; Silva, PC; Silva, HR; Solar, BR. 1999. Chapter 14: Wheat production in Mediterranean environments. In Satorre, EH; Salfer, GA. (eds.). *Wheat, Ecology and Physiology of yield determination*. New York, USA, The Haworth Press. Inc. p. 295-331.
- Acevedo, E; Silva, P; Silva, H. 2002. Wheat growth and physiology. In Curtis, BC; Rajaram, S; Gómez Macpherson, H. (eds.). *Bread Wheat – Improvement and Production*. Roma, Italia, FAO Plant Production and Protection Series 30. Consultado 26 Enero 2021. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y4011e06.htm#bm06>
- Ahakupaz, F; Hervan, EM; Roostaei, M; Bihamta, MR; Mohammadi, S. 2020. Evaluation of rain-fed wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding* 9(1):28-40.
- Aharon, R; Shahak, Y; Wininger, S; Bendov, R; Kapulnik, Y; Galili, G. 2003. Overexpression of a plasma membrane aquaporin in transgenic tobacco improves plant vigor under favorable growth conditions but not under drought or salt stress. *The Plant Cell* 15:439-447.
- Ahmad, M; Arain, M A. 1999. Effect of drought simulation on grain weight, protein and lysine content of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany* 31(1):109-114.
- Ahmadi-Lahijani, MJ; Emam, Y. 2016. Post-anthesis Drought Stress Effects on Photosynthesis Rate and Chlorophyll Content of Wheat Genotypes. *Journal of Plant Physiology and Breeding* 6(1):35-52.
- Ahmadizadeh, M; Nori, A; Shahbaz, H; Aharizad, S. 2011. Correlated response of

morpho-physiological traits of grain yield in durum wheat under normal irrigation and drought stress conditions in greenhouse. *African Journal of Biotechnology* 10(85):19771-19779.

- Alegría, JF. 2009. Conflictos y gestión del agua en Perú en contexto de cambio climático. In *Boletín del Agua*. Lima, Perú, Instituto de Promoción para la Gestión del Agua (IPROGA) 41.
- Ali, E; Iqbal, A; Hussain, S; Shah, JM; Said, F; Imtiaz, M; Jalal, F; Khan, MA. 2019. Selection Criteria to Assess Drought Stress Tolerance in Wheat Genotypes Using Physiological and Biochemical Parameters. *Biosciences Biotechnology Research Asia*,16(4):751-762.
- Amado Argüelles, AG. 2016. Efecto del déficit hídrico moderado en la fase fenológica del espigado y madurez de grano en 15 líneas avanzadas de *Triticum aestivum* L. “trigo harinero”, La Molina, Lima – Perú. Tesis Blga. Arequipa, Perú, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. 85 p.
- Anjum, SA; Xie, XY; Wang, LC; Saleem, MF; Man, C; Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research* 6(9): 2026-2032.
- Bagrei, B; Bybordi, A. 2015. Yield and yield components in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under non-stress and drought stress conditions. *International Journal of Biosciences* 6(3):338-348.
- Bahar, B; Yildirim, M. 2010. Heat and drought resistances criteria in spring bread wheat: Drought resistance parameters. *Scientific Research and Essays* 5(13):1742-1745.
- Barrs, HD; Weatherley, PE. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Science* 15:413-428.
- Bates, LS; Waldren, RP; Teare, TD. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Journal Plant and Soil* 39:205-207.
- Bidinger, F; Mahalakshimi, V; Rao, G. 1987. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke) Y factor affecting yields under stress. *Australian Journal Agricultural Research* 38:37-48.
- Blum, A. 1988. *Plant breeding for stress environments*. CRC Press, Boca Ratón, Florida, p. 223.
- Blum A, Sinmena B, Mayer J, Golan G, Shpiler L. 1994. Stem reserve mobilization

- supports wheat-grain filling under heat stress. *Australian Journal of Plant Physiology* 21:771–781.
- Bravo, C. 2004. Curso de Introducción a la Programación SAS® v.8, Versión de manual 1.2. Universidad Complutense de Madrid. (En línea). Consultado 3 Agosto 2015. Disponible en: [http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Progra/SAS\\_V8\\_V1\\_2.pdf](http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Progra/SAS_V8_V1_2.pdf)
- Bray, E. 1993. Molecular Responses to Water Deficit. *Plant Physiology* 103:1035-1040.
- Bray, E. 1997. Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science* 2(2):48-54.
- Cardona-Ayala, C; Jarma-Orozco, A; Araméndiz-Tatis, H; Peña-Agresott, M; Vergara-Córdoba, C. 2014. Respuestas fisiológicas y bioquímicas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) bajo déficit hídrico. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 8(2):250-261.
- Castro, M; Berger, A; Ibáñez, V; Viega, L; Sastre, M; Vázquez, D; Gaso, D; Otero, A. 2011. Efecto del anegamiento en diferentes estados fenológicos de trigo y cebada. En *Mudancas climáticas globais: de gene a planta*, XIII Congreso Brasileiro de Fisiología Vegetal y XIV Reunión Latinoamericana de Fisiología Vegetal, Buzios, Brasil. p. 202.
- Castro, M; Berger, A; Viega, L; Vázquez, D; Gaso, D; Otero, A. 2012. Effect of flooding stress on wheat and barley. En *Plant Abiotic Stress Tolerance II*, Viena, Austria Abstracts N 164.
- Chaitanya, KV; Jutur, PP; Sundar, D; Ramachandra R, A. 2003. Water stress effects on photosynthesis in different mulberry cultivars. *Journal Plant Growth Regulation* 40:75–80.
- Chandrasekar, V; Sairam, RK; Srivastava, GC. 2000. Physiological and Biochemical Responses of Hexaploid and Tetraploid Wheat to Drought Stress. *Journal Agronomy & Crop Science* 185:219-227.
- Chaves, MM. 1991. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany* 42:1-16.
- Chaves, MM; Pereira, JS; Maroco, JP; Rodrigues, ML; Ricardo, CPP; Osorio, ML; Carvalho, I; Faria, T; Pinheiro, C. 2002. How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89:907–916.
- Chaves, MM; Maroco, JP; Pereira, JS. 2003. Understanding plant response to drought:

- from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 30:239–264.
- Chaves, MM; Oliveira, MM. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany* 55(407):2365–2384.
- Chaves, MM; Flexas, J; Pinheiro, C. 2009 Photosynthesis under drought and salt Stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Journal Annals of Botany* 103:551-560.
- Chorfi, A; Taïbi K. 2011. Biochemical screening for osmotic adjustment of wheat genotypes under drought stress. *Tropicultura* 29(2):82–87.
- Constable, GA; Rawson, HM. 1980. Effect of Leaf Position, Expansion and Age on Photosynthesis, Transpiration and Water Use Efficiency of Cotton. *Journal Australian Journal of Plant Physiology* 7:89-100.
- Delauney, AJ; Verna, DP. 1985. Prolinebiosynthesis and osmoregulations in plants. *The Plant Journal* 4:215-223.
- De San Celedonio, RP; Abeledo, LG; Miralles, DJ. 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil* 378:265-277.
- Dodig, D; Zoric, M; Knezevic, D; King, S R; Surlan-Momirovic, G. 2008. Genotype x environment interaction for wheat yield in different drought stress conditions and agronomic traits suitable for selection. *Australian Journal of Agricultural Research* 59:536-545.
- Duggan, BL; Domitruk, DR; Fowler, DB. 2000. Yield component variation in winter wheat grown under drought stress. *Canadian Journal of Plant Science* 80(4):739-745.
- Estrada-Campuzano, G; Slafer, G A; Miralles, D J. 2012. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. *Field Crops Research* 128:167–179.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2020. Situación Alimentaria Mundial. Consultado Abr 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>.
- Fernandez, GCJ. 1993. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In Kuo, CG. (eds.). *Adaptation of food crops to temperature and water stress: Proceedings of an international symposium, Taiwan, 13-18 August 1992*. Taipei, Taiwan, Asian Vegetable Research and Development Center p. 257-270.

- Fischer, RA; Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain Yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29:897-912.
- Fischer, RA; Turner, NC. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annual Review Plant Physiology* 29:277-317.
- Fischer, RA; Wood, JT. 1979. Drought Resistance in Spring Wheat Cultivars. III. Yield Associations with Morpho-physiological Traits. *Australian Journal of Agricultural Research* 30:1001-1020.
- Fischer, RA; Wood, JT. 1981. Breeding and selection for drought tolerance in tropical maize. *Proceedings of Symposium on Principles and Methods in Crop Improvement for Drought Resistance with Emphasis on Rice, IRRI, Philippines.*
- Fitter, AH; Hay, RKM. 2002. *Environmental Physiology of Plants*. Academic Press. Gran Bretaña. p. 131-190.
- Flexas, J; Medrano, H. 2002. Energy dissipation in C3 plants under drought. *Functional Plant Biology* 29:1209–1215.
- Flexas, J; Bota, J; Cifre, J; Escalona, JM; Galmés, J; Gulías, J; Lefi, EK; Martínez-Cañellas, SF; Moreno, MT; Ribas-Cabó, M; Riera, D; Sampol, B; Medrano, H. 2004. Understanding downregulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Annals of Applied Biology* 144:273–283.
- Flowers, TJ; Koyama, ML; Flowers, SA; Sudhabar, C; Singh, KP; Yeo, AR. 2000. QTL their place in engineering tolerance of rice to salinity. *Journal of Experimental Botany* 51:99-106.
- Foulkes, M J; Scott, RK; Sylvester-Bradley, R. 2002. The ability of wheat cultivars to withstand drought in UK conditions: formation of grain yield. *Journal of Agricultural Science* 138:153–169.
- Foyer, CH; Noctor, G. 2003. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. *Physiologia Plantarum*. 119:355–364.
- Galbiati, J. 2007. Regresión Lineal Simple. In *Revista Digital Letra Media*. (En línea). Consultado Junio 2017. Disponible en: [http://www.jorgegalbiati.cl/enero\\_07/Regresion.pdf](http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf)
- Gebbing, T; Schnyder, H. 1999. Pre-anthesis reserve utilization for protein and carbohydrate synthesis in grains of wheat. *Plant Physiology* 121:871–878.

- Gent, MPN. 1994. Photosynthate reserves during grain filling in winter wheat. *Agronomy Journal* 86:159–167.
- Gorham, J; Jones, RGW; McDonnell, E. 1985. Some mechanism of salt tolerance in crop plants. *Plant and Soil* 89:15-40.
- Guo, R; Shi, LX; Jiao, Y; Li, MX; Zhong, XL; Gu, FX; Liu, Q; Xia, X; Li, HR. 2018. Metabolic responses to drought stress in the tissues of drought-tolerant and drought-sensitive wheat genotype seedlings. *Annals of Botany Plants* 10(2):1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply016>.
- Guttieri, MJ; Stark, JC; O'Brien, K; Souza, E. 2001. Relative Sensitivity of Spring Wheat Grain Yield and Quality Parameters to Moisture Deficit. *Crop Science* 41(2):327-335.
- Hatfield, JL; Dold, C. 2018. Agroclimatology and wheat production: Coping with climate change. *Frontiers Plant Science* 9(224):1-5. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00224>.
- He, Y; Wei, Y; Depauw, R; Qian, B; Lemke, R; Singh, A; Cuthbert, R; McConkey, B; Wang, H. 2013. Spring wheat yield in the semiarid Canadian prairies: Effects of precipitation timing and soil texture over recent 30 years. *Field Crops Research* 149:329–337.
- Hochman, ZVI. 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field Crop Research* 5:55-67.
- Holdridge, LR. 1960a. Apéndice B: Un sistema para clasificar las formaciones del mundo. In Tosi, JA. Zonas de vida natural en el Perú. Memoria explicativa sobre el Mapa Ecológico del Perú. Boletín técnico IICA-OEA Zona Andina 1960-5:265-271.
- Holdridge, LR. 1960b. Figura 1: Sistema de clasificación de las formaciones vegetales o zonas de vida natural del mundo. In Tosi, JA. Zonas de vida natural en el Perú. Memoria explicativa sobre el Mapa Ecológico del Perú. Boletín técnico IICA-OEA Zona Andina 5:7.
- Ingram, J; Bartels, D. 1996. The molecular basis of dehydration tolerance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 47:377–403.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú). 2013. IV Censo Nacional Agropecuario 2012 - Cuadro N° 049: Superficie Sembrada De Cultivos Transitorios En La Campaña Agrícola Agosto 2011 - Julio 2012, Por Tamaño De La Unidad Agropecuaria Según Cultivo Y Tipo De Agricultura. (En línea). Consultado 2 Julio

2019. Disponible en: <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/censos/>

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, JT; Ding, Y; Griggs, DJ; Noguer, M; Van der Linden, PJ; Xiaosu, D. (eds.). Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Johari-Pireivatlou, M. 2010. Effect of soil water stress on yield and proline content of four wheat lines. *African Journal of Biotechnology* 9 (1): 036-040.
- Johari-Pireivatlou, M; Maralian, H. 2011. Evaluation of 10 wheat cultivars under water stress at Moghan (Iran) condition. *African Journal of Biotechnology* 10(53):10900-10905.
- Kashiwagi, J; Krishnamurthy, L; Singh, S; Upadhyaya, HD. 2006. Variation of SPAD Chlorophyll Meter Readings (SCMR) in the Mini-Core Germplasm Collection of Chickpea. *SAT eJournal* publicado por published by ICRISAT 2(1).
- Khakwani, A A; Dennett, M D; Munir, M; Baloch, M S. 2012. Wheat yield response to physiological limitations under water stress conditions. *The Journal of Animal & Plant Sciences* 22(3):773-780.
- Kumar, S; Sehgal, SK; Kumar, U; Prasad, PVV; Joshi, AK; Gill, BS. 2012. Genomic characterization of drought tolerance-related traits in spring wheat. *Euphytica* 186:265–276.
- Latham, M C. 2002. Capítulo 26: Cereales, raíces feculentas y otros alimentos con alto contenido de carbohidratos. Del libro: *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. Colección FAO: Alimentación y nutrición 29 (en línea). Consultado el 30 Agosto 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/w0073s/w0073s0u.htm>.
- Li, P; Chen, J; Wu, P. 2011. Agronomic characteristics and grain yield of 30 spring wheat genotypes under drought stress and nonstress conditions. *Agronomy Journal* 103(6):1619-1628.
- Lopes S, M; Reynolds M, P. 2011. Drought adaptive traits and wide adaptation in elite lines derived from resynthesized hexaploid wheat. *Crop Science* 51:1617-1626.
- Lopes S, M; Reynolds M, P; Jalal-Kamali, M R; Moussa, M; Feltaous, Y; Tahir, I S A; Barma, N; Vargas, M; Mannes, Y; Baum, M. 2012. The yield correlations of selectable physiological traits in a population of advanced spring wheat lines grown in warm and drought environments. *Field Crops Research* 128:129–136.

- Ludlow, MM; Muchow, RC. 1990. A Critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Journal Advances in Agronomy* 43:107-153.
- Madhava Rao, KV. 2006. Chapter 1: Introducción. In Madhava Rao, KV; Raghavendra, AS; Janardhan Reddy, K (eds.) *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Dordrecht, Países Bajos. Springer. p. 1-14.
- Mahpara, S; Hussain, ST; Farooq, J. 2014. Drought tolerance studies in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cercetări Agronomice în Moldova XLVII* 4 (160): 133-140.
- Malik, T A; Wright, D; Virk, D S. 1999. Inheritance of net photosynthesis and transpiration efficiency in spring wheat, *Triticum aestivum* L., under drought. *Plant Breeding* 118:93-95.
- Marcin'ska, I; Czyczyło-Mysza, I; Skrzypek, E; Filek, M; Grzesiak, S; Grzesiak, MT; Janowiak, F; Hura, T; Dziurka, M; Dziurka, K; Nowakowska, A; Quarrie, SA. 2013. Impact of osmotic stress on physiological and biochemical characteristics in drought-susceptible and drought-resistant wheat genotypes. *Acta Physiology Plant* 35:451–461.
- Marti, J; Savin, R; Slafer, G. 2015. Wheat yield as affected by length of exposure to waterlogging during stem elongation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(6):473-448. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jac.12118>.
- Martínez Cruz, E; Espitia Rangel, E; Villaseñor Mir, HE; Hortelano SantaRosa, R. 2020. La productividad del trigo harinero bajo diferentes condiciones de riego. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 11(6):1349-1360.
- McCaig, TN; Clarke, JM. 1982. Seasonal changes in nonstructural carbohydrate levels of wheat and oats grown in semiarid environment. *Crop Science* 22(5):963-970.
- Meena, RP; Tripathi, SC; Chander, S; Chookar, RS; Verma, MA; Sharma, RK. 2015. Identifying drought tolerant wheat varieties using different indices. *SAARC Journal of Agriculture* 13(1):148-161.
- Mia, S; Liu, H; Wang, X; Lu, Z; Yan, G. 2017. Response of wheat to post-anthesis water stress, and the nature of gene action as revealed by combining ability analysis. *Crop & Pasture Science* 68:534-543.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura, Perú). 2013. Trigo – Principales Aspectos de la Cadena Agroproductiva. Dirección General de Competitividad Agraria, 1ra Edición. Consultado 07 Mayo 2020. Disponible en: <http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroeconomia/agroeconomi>

a\_trigo.pdf

- MINAGRI (Ministerio de Agricultura, Perú). 2019. Informe de Seguimiento Agroeconómico ISA: IV – Trimestre 2018. Dirección de Estadística Agraria. Consultado 05 Mayo 2020. Disponible en: [http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/informe\\_seguimiento\\_agroeconomico-iv\\_trim18\\_030419.pdf](http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/informe_seguimiento_agroeconomico-iv_trim18_030419.pdf)
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura, Perú). 2020. Actividades Estadísticas: Serie de Estadísticas de Producción Agrícola. Sistema Integrado de Estadística Agraria. Consultado 07 Mayo 2020. Disponible en: [http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)
- Misra, SC; Shinde, S; Geerts, S; Rao, VS; Monneveux, P. 2010. Can carbon isotope discrimination and ash content predict grain yield and water use efficiency in wheat?. *Journal Agricultural Water Management* 97:57-65.
- Mohammadi, R. 2019. The use of a combination scoring index to improve durum productivity under drought stress. *Experimental Agriculture* 2019:1–10.
- Montgomery, D. 1991. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- Morgan, JM; Condon, AG. 1986. Water use, grain yield and osmoregulation in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 13:523–532.
- Mwadingeni, L; Shimelis, H; Dube, E; Laing, MD; Tsilo, TJ. 2016. Breeding wheat for drought tolerance: Progress and technologies. *Journal of Integrative Agriculture* 15(5):935–943.
- Nageswara Rao, RC; Talwar, HS; Wright, GC. 2001. Rapid Assessment of Specific Leaf Area and Leaf Nitrogen in Peanut (*Arachis hypogaea* L.) using a Chlorophyll Meter. *J. Agronomy & Crop Science* 186:175-182.
- Nieves H, A; Domínguez S, F. 2009, Capítulo 13 Análisis de correlación y regresión. Del libro: *Probabilidad y Estadística para Ingeniería*. McGraw Hill Interamericana, p. 16 (en línea). Consultado 11 Junio 2017. Disponible en: [http://www.mcgraw-hill.com.mx/pye01e/cap13/13analisis\\_de\\_correlacion\\_y\\_regresion.pdf](http://www.mcgraw-hill.com.mx/pye01e/cap13/13analisis_de_correlacion_y_regresion.pdf)
- Nonami, H. 1998. Plant water relations and control of cell elongation at low water potentials. *Journal of Plant Research* 111:373-382.
- Ober, ES; Clark, CJA; Le Bloa, M; Royal, A; Jaggard, KW; Pidgeon, JD. 2004. Assessing the genetic resources to improve drought tolerance in sugar beet: agronomic traits of

- diverse genotypes under droughted and irrigated conditions. *Field Crops Research* 90:213–234.
- Ort, DR. 2001. When there is too much light. *Plant Physiology* 125:29–32.
- Ortiz, M; Silva, H; Silva, P; Acevedo, E. 2003. Estudio de parámetros hídricos foliares en trigo (*Triticum aestivum* L.) y su uso en selección de genotipos resistentes a sequía. *Revista Chilena de Historia Natural* 76:219-233.
- Patel, JM; Patel, AS; Patel, CR; Pansuria, AG; Patel, RM; Vanapariya, LG. 2017. Evaluation of selection indices for drought tolerance in some bread wheat genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding* 8(3):834-841.
- Patel, JM; Patel, AS; Patel, CR; Mamrutha, HM; Pradeep, S; Pachchigar, KP. 2019. Evaluation of selection indices in screening durum wheat genotypes combining drought tolerance and high yield potential. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 8(4):1165-1178.
- Peng, S; Laza, RC; Khush, GS; Sanico, AL; Visperas, RM; Garcia, FV. 1998. Transpiration efficiencies of indica and improved tropical japonica rice grown under irrigated conditions. *Euphytica* 103:103–108.
- Pereira, JS; Chaves, MM. 1993. Plant water deficits in Mediterranean ecosystems. In Smith, JAC; Griffiths H. (eds.). *Plant responses to water deficits – from cell to community*. Oxford: Bios Scientific Publishers p. 237–248.
- Pereira, JS; Chaves, MM. 1995. Plant responses to drought under climate change in Mediterranean-type ecosystems. In Moreno, JM; Oechel, WC. (eds.). *Global change and mediterranean-type ecosystems*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag p. 140–160.
- Pérez, O. 2015. Efectos del déficit hídrico en cinco cultivares de trigo. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República - Facultad de Agronomía. 100 p.
- Pérez-Alfocea, F; Estañ, MT; Caro, M; Guerrier, G. 1993. Osmotic adjustment in *Lycopersicon esculentum* and *L. pennellii* under NaCl and polyethylene glycol 6000 iso-osmotic stress. *Physiologia Plantarum* 25:493-498.
- Pinheiro, C; Chaves, MM; Ricardo, CP. 2001. Alterations in carbon and nitrogen metabolism induced by water deficit in the stems and leaves of *Lupinus albus* L. *Journal of Experimental Botany* 52:1063–1070.
- Pinheiro, C; Passarinho, JA; Ricardo, CP. 2004. Effect of drought and rewatering on the metabolism of *Lupinus albus* organs. *Journal of Plant Physiology* 161(11):1203-

1210.

- Pokharel, D; Simkhada, R; Pandey, MP. 2015. Screening Nepalese Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes through Variability and Correlation Study of Drought Adaptive Morpho-physiological Traits. *Agriculture Development Journal* 11:30-44.
- Qaseem, MF; Qureshi, R; Muqaddasi, QH; Shaheen, H; Kousar, R; Röder, MS. 2018. Genome-wide association mapping in bread wheat subjected to independent and combined high temperature and drought stress. *PLoS ONE* 13(6):e0199121. Consultado 11 Enero 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199121>.
- Quiriban, A; Pereyra Cardozo, M. 2017. La acumulación de prolina como indicador bioquímico de tolerancia a sequía en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) sometidos a la suspensión del riego en inicio de encañazón. *Semiárida Revista de la Facultad de Agronomía Universidad Nacional de la Pampa* 27(2):51-57. Disponible en <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiárida/article/view/2971/2875>.
- Ramirez-Vallejo, P; Kelly, JD. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99:127–136.
- Raymond, MJ; Smirnoff, N. 2002. Proline metabolism and transport in maize seedlings at low water potential. *Journal Annals of Botany* 89:813-823.
- Rentsch, D; Hirner, B; Schmeizer, E; Frommer, WB. 1996. Salt stress-induced proline transporters and salt-repressed broad specificity amino acid permeases identified by suppression of a yeast amino acid permease-targeting mutant. *Plant Cell* 8:1437-1446.
- Reynolds, M; Foulkes, J; Furbank, R; Griffiths, S; King, J; Murchie, E; Parry, M; Slafer, GA. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell Environment* 35:1799-1823.
- Ribaut, JM; Jiang, C; Gonzalez-de Leon, D; Edmeades, GO; Hoisington, DA. 1997. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize 2. Yield components and marker assisted selection strategies. *Theoretical and Applied Genetics* 94:887-896.
- Richards, RA. 1996. Defining selection criteria to improve yield under drought. *Plant Growth Regulation* 20:157-166.
- Richards, RA; Condon, AG; Rebetzke, GJ. 2001. Traits to improve yield in dry environments. In Reynolds, MP; Ortiz-Monasterio, JI; McNab, A. (eds.). *Application of physiology in wheat breeding*. Mexico, CIMMYT p. 88–100.

- Rivelli, AR; James, RA; Munns, R; Condon, AG. 2002. Effect of salinity on water relations and growth of wheat genotypes with contrasting sodium uptake. *Journal Functional Plant Biology* 29:1065–1074.
- Rosielle, AA; Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science* 21:943–946.
- Saeedipour, S; Moradi, F. 2011. Effect of Drought at the Post-anthesis Stage on Remobilization of Carbon Reserves and Some Physiological Changes in the Flag Leaf of Two Wheat Cultivars Differing in Drought Resistance. *Journal of Agricultural Science* 3(3):81-92.
- Saint-Pierre, C; Peterson, C J; Ross, A S; Ohm, J B; Verhoeven, M C; Larson, M; Hoefler, B. 2008. White Wheat Grain Quality Changes with Genotype, Nitrogen Fertilization, and Water Stress. *Agronomy Journal* 100(2):414-420.
- Sainz, M; Díaz, P; Monza, J; Borsani, O. 2010. Heat stress results in loss of chloroplast Cu/Zn superoxide dismutase and increased damage to photosystem II in combined droughtstressed *Lotus japonicus*. *Physiologia Plantarum* 140(1):46-56.
- Saleem, M. 2003. Response of Durum and Bread wheat Genotypes to Drought Stress: Biomass and Yield Components. *Asian Journal of Plant Sciences* 2(3):290-293.
- Samarakoon, AB; Müller, WJ; Gifford, RM. 1995. Transpiration and Leaf Area Under Elevated CO<sub>2</sub>: Effects of Soil Water Status and Genotype in Wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 22:33-44.
- SAS Institute Inc. 2015. Base SAS® 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures, Fourth Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc. Consultado 23 Noviembre 2020. Disponible en:  
[http://support.sas.com/documentation/cdl/en/procstat/68142/HTML/default/viewer.htm#procstat\\_corr\\_details01.htm](http://support.sas.com/documentation/cdl/en/procstat/68142/HTML/default/viewer.htm#procstat_corr_details01.htm)
- Sayre, KD; Rajaram, S; Fischer, RA. 1997. Yield potencial progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Science* 37:36-42.
- Simmonds, DH. 1981. Chapter 10: Wheat Proteins: Their Chemistry and Nutritional Potential. In Evans, L.T; Peacock, W.J; Frankel, O.H. (eds.). *Wheat science, today and tomorrow*. Australia, Cambridge University Press.
- Schulze, ED. 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and the soil. *Annual Review of Plant Physiology* 37:247–274.
- Sinclair, TR; Tanner, CB; Bennett, JM. 1984. Water-Use Efficiency in Crop Production.

Journal BioScience 34(1):36-40.

- Sinclair, TR; Ludlow, MM. 1986. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian Journal of Plant Physiology* 13:329-341.
- Šramková, Z; Gregová, E; Šturdíka, E. 2009. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chimica Slovaca* 2(1):115-138.
- Taheri, S; Saba, J; Shekari, F; Abdullah, TL. 2011. Effects of drought stress condition on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum*) lines. *African Journal of Biotechnology* 10(80):18339-18348.
- Takebe, M; Yoneyama, T; Inada, K; Murakami, T. 1990. Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. *Journal Plant and Soil* 122:295-297.
- Talebi, R; Fayaz, F; Naji, AM. 2009. Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *General and Applied Plant Physiology* 35 (1-2):64-74.
- Tambussi, EA; Nogués, S. 2005. Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism. *Plant* 221:446-458.
- Tatar, Ö; Gevrek, MN. 2008. Influence of water stress on proline accumulation, lipid peroxidation and water content of wheat. *Asian Journal of Plant Sciences* 7(4):409-412.
- Thiry, AA; Chavez D, PN; Reynolds, MP; Davies, WJ. 2016. How can we improve crop genotypes to increase stress resilience and productivity in a future climate? A new crop screening method based on productivity and resistance to abiotic stress. *Journal of Experimental Botany* 67(19):5593-5603.
- Ueda, A; Kathiresan, A; Inada, M; Narita, Y; Nakamura, T; Shi, W; Takabe, T; Bennett, J. 2004. Osmotic stress in barley regulates expression of a different set of genes than salt stress does. *Journal of Experimental Botany* 55(406):2213-2218.
- Valdés Valdés, C; Estrada Campuzano, G; Martínez Rueda, CG; Domínguez López, A. 2017. Rendimiento de grano en trigo modificado por cambios en la fuente durante el llenado de grano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(1):79-90.
- Valdés Valdés, C; Estrada Campuzano, G; Domínguez López, A; Martínez Rueda, CG; Morales-Rosales, EJ. 2019. Variabilidad en carbohidratos solubles del tallo y su contribución al rendimiento de grano en trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(3):615-627.
- Varga, B; Vida, G; Varga-László, E; Bencze, S; Veisz, O. 2015. Effect of Simulating

- Drought in Various Phenophases on the Water Use Efficiency of Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 201:1-9.
- Venske, E; Dos Santos, RS; Busanello, C; Gustafson, P; Costa de Oliveira, A. 2019. Bread wheat: a role model for plant domestication and breeding. *Hereditas* 156(16):1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s41065-019-0093-9>.
- Xiong, L; Zhu, JK. 2002. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, Cell and Environment* 25:131–140.
- Yadava, UL. 1986. A rapid and nondestructive method to determine chlorophyll in intact leaves. *Journal Horticulture Science* 21:1449–1450
- Yana Ali, E. 2018. Identificación de genotipos de trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*) tolerantes a sequía empleando indicadores morfológicos y fisiológicos. Tesis M.Sc. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina. 171p.
- Yang, J; Zhang, J; Huang, Z; Zhu, Q; Wang, L. 2000. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. *Crop Science* 40:1645–1655.
- Yang, J; Zhang, J; Wang, Z; Zhu, Q; Liu, L. 2001. Water deficit induced senescence and its relationship to the remobilization of pre-stored carbon in wheat during grain filling. *Agronomy Journal* 93:196–206.
- Yeo, AR; Lee, KS; Izard, P; Boursier, PJ; Flowers, TJ. 1991. Short and long-term effects of salinity and leaf growth in rice (*Oryza sativa* L.). *Journals of Experimental Botany* 25:881-889.
- Yeo, A. 1998. Molecular biology of salt tolerance in the context of whole-plant physiology. *Journal of Experimental Botany* 49(323):915–929.
- Zadoks, JC; Chang, TT; Konzak, CF. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Journal Weed Research* 14(6):415–421.
- Zhang, H; Oweis, T Y; Garabet, S; Pala, M. 1998. Water-use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rain-fed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean-type environment. *Plant and Soil* 201:295–305.
- Zhu, JK. 2001. Cell signalling under salt, water and cold stresses. *Current Opinion in Plant Biology* 4:401–406.
- Zhu, JK. 2002. Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology* 53:247–273.

## VIII. ANEXOS

Anexo 1: Determinación de la Prolina libre acumulada bajo condiciones de estrés  
Protocolo para determinación de prolina (Prof. Blgo. Abelardo Calderón Rodríguez, MSc).

### Materiales:

- Hojas de trigo del tercio superior de la planta.
- Espectrofotómetro
- Agua destilada
- Ninhidrina ácida
- Mortero de porcelana
- Tolueno
- Ácido sulfosalicílico al 3% en agua
- Balanza analítica
- Arena de cuarzo
- Papel filtro
- Tubos de ensayo
- Ácido acético glacial
- Estufa y algodón

### Procedimiento:

- Coger 0.5 g. de hojas extendidas de trigo.
- Moler con un poco de arena de cuarzo y adicionar 10 mL. del ácido sulfosalicílico.
- Filtrar a un tubo de ensayo usando papel filtro o algodón.
- Del filtrado, tomar una alícuota de 2 mL. para llevarlo a otro tubo de ensayo y añadir 2 mL. de ácido acético glacial y luego 2 mL. de la ninhidrina ácida.
- Incubar a 100°C durante una hora.
- Enfriar rápidamente en agua helada.
- Adicionar 4mL. de tolueno y agitar en un vórtex durante 15-20 segundos.
- Aspirar el tolueno conteniendo el cromóforo desde la fase acuosa y ponerlo a temperatura ambiente.
- Leer la absorbancia a 520nm. usando tolueno como blanco.

La concentración de prolina se determina a partir de una curva estándar elaborada previamente y se calcula sobre la base del peso fresco como sigue:

$$\frac{[(\mu\text{g prolina/mL} \times \text{Tolueno mL})/115.5 \mu\text{g}/\mu \text{ moléculas}]}{[(\text{g muestra})/5]} = \mu\text{moles Prolina/g de peso fresco del material}$$

La ninhidrina ácida se prepara calentando 1.25 g. de ninhidrina en 30 mL. de ácido acético glacial y 20 mL. de ácido fosfórico 6 M. con agitación hasta su completa disolución. El reactivo permanece estable 24 horas a 4°C.

Anexo 2: Tabla de correlación de Pearson entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina..

	Rendimiento	Antesis	Maduración	Llenado de grano	Altura	Biomasa	Índice de cosecha	Nro de espigas	Nro de granos	Peso de 100 granos	Fotosíntesis 14 dde	Fotosíntesis 33 dde	Clorofila 10 dde	Clorofila 20 dde	Agua de prueba	EUA	CRA	Proteína
Rendimiento		0.62	-0.24	-0.51	0.81**	0.97**	0.08	0.73	0.65	0.19	0.44	-0.55	-0.36	-0.37	0.60	0.63	0.83**	0.30
Antesis	0.52		-0.60	-0.93**	0.69	0.70	-0.33	0.53	0.64	-0.07	0.71	-0.87**	-0.33	-0.61	0.44	-0.03	0.84**	0.18
Madurez	0.74	0.77		0.86**	-0.36	-0.36	0.50	-0.28	-0.55	0.20	0.09	0.26	-0.16	-0.18	-0.37	0.28	-0.20	-0.14
Llenado de grano	0.26	-0.42	0.26		-0.61	-0.62	0.45	-0.47	-0.67	0.14	-0.42	0.72	0.13	0.31	-0.46	0.15	-0.67	-0.19
Altura	0.31	0.59	0.24	-0.55		0.86*	-0.21	0.57	0.64	0.33	0.27	-0.36	-0.37	-0.47	0.32	0.53	0.92**	0.12
Biomasa	0.82**	0.77	0.75	-0.10	0.63		-0.18	0.80	0.75	0.16	0.45	-0.62	-0.28	-0.34	0.64	0.52	0.87**	0.32
Índice de cosecha	0.16	-0.56	-0.12	0.66	-0.61	-0.41		-0.34	-0.46	0.12	0.02	0.22	-0.33	-0.15	-0.23	0.40	0.01	-0.07
Número de espigas	0.72	0.72	0.76	-0.01	0.40	0.84**	-0.32		0.76	-0.14	0.39	-0.70	-0.03	-0.12	0.79	0.20	0.65	0.31
Número de granos	0.61	0.54	0.52	-0.09	0.62	0.81**	-0.39	0.57		-0.13	0.38	-0.71	0.09	0.10	0.63	0.14	0.66	0.30
Peso de 100 granos	0.43	-0.13	0.32	0.66	-0.24	0.11	0.51	0.15	0.08		-0.15	0.36	0.14	0.19	-0.23	0.48	0.24	0.10
Fotosíntesis 14dde	0.51	0.81**	0.59	-0.50	0.52	0.61	-0.38	0.52	0.64	-0.37		-0.84**			0.46	-0.15	0.40	0.32
Fotosíntesis 33dde	0.63	0.77	0.68	-0.29	0.35	0.75	-0.42	0.79	0.53	0.16	0.49				-0.82**	0.36	-0.49	-0.14
Clorofila 10 dde	0.35	0.06	0.50	0.63	-0.30	0.10	0.49	0.22	0.07	0.62				0.61	0.14	-0.40		0.30
Clorofila 20 dde	-0.36	-0.42	-0.07	0.51	-0.75	-0.62	0.68	-0.38	-0.54	0.30			0.54		-0.01	-0.18		0.44
Agua transpirada en prueba	0.74	0.35	0.79	0.58	-0.06	0.63	0.14	0.69	0.45	0.49	0.28	0.35	0.70	0.12		-0.11	0.32	0.23
EUA	0.25	-0.42	-0.40	0.06	0.17	0.01	0.38	-0.20	0.12	0.21	-0.37	-0.13	-0.40	-0.60	-0.22		0.67	0.16
CRA	0.31	0.13	0.35	0.30	-0.06	0.12	0.35	0.38	0.27	0.45	0.10	-0.02			0.48	-0.43		0.09
Proteína	0.61	0.78	0.60	-0.32	0.54	0.85**	-0.49	0.81**	0.69	-0.09	0.70	0.80**	-0.17	-0.56	0.48	-0.13	0.13	

Los valores sobre las casillas gris corresponden a coeficientes de correlación bajo riego óptimo, los valores bajo las casillas gris corresponden a coeficientes de correlación bajo riego limitado. Los valores cercanos a 1 indican asociación positiva, los valores cercanos a -1 indican asociación negativa, y los valores cercanos a 0 indican que no hay asociación entre las variables (Galbiati, 2007). (\*\*): Correlación fuerte (Nieves y Domínguez, 2009) con p-value <0.01, sombreados en rojo.

Anexo 3: Tabla de p-value de correlación entre las características agronómicas, fisiológicas y bioquímicas de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) en dos ambientes de riego bajo condiciones de La Molina.

	Rendimiento	Antesis	Maduración	Llenado de grano	Altura	Biomasa	Índice de cosecha	Nro de espigas	Nro de granos	Peso de 100 granos	Fotosíntesis 14 dde	Fotosíntesis 33 dde	Clorofila 10 dde	Clorofila 20 dde	Agua de prueba	EUA	CRA	Proteína
Rendimiento		0.001	0.231	0.007	0.000	0.000	0.708	0.000	0.000	0.355	0.128	0.051	0.229	0.216	0.001	0.000	0.000	0.130
Antesis	0.005		0.001	0.000	0.000	0.000	0.089	0.005	0.000	0.726	0.006	0.000	0.270	0.028	0.020	0.895	0.000	0.361
Madurez	0.000	0.000		0.000	0.061	0.066	0.009	0.159	0.003	0.307	0.768	0.389	0.593	0.555	0.060	0.161	0.510	0.475
Llenado de grano	0.183	0.030	0.190		0.001	0.001	0.019	0.013	0.000	0.482	0.156	0.006	0.665	0.304	0.016	0.463	0.013	0.356
Altura	0.110	0.001	0.233	0.003		0.000	0.297	0.002	0.000	0.094	0.369	0.228	0.213	0.104	0.099	0.005	0.000	0.544
Biomasa	0.000	0.000	0.000	0.623	0.000		0.383	0.000	0.000	0.438	0.123	0.025	0.362	0.250	0.000	0.005	0.000	0.109
Índice de cosecha	0.415	0.003	0.543	0.000	0.001	0.032		0.088	0.016	0.546	0.943	0.463	0.274	0.629	0.239	0.040	0.981	0.746
Número de espigas	0.000	0.000	0.000	0.943	0.037	0.000	0.101		0.000	0.501	0.189	0.007	0.926	0.697	0.000	0.324	0.016	0.110
Número de granos	0.001	0.003	0.006	0.673	0.001	0.000	0.042	0.002		0.503	0.202	0.007	0.778	0.756	0.000	0.498	0.013	0.128
Peso de 100 granos	0.026	0.507	0.103	0.000	0.219	0.568	0.007	0.452	0.679		0.614	0.222	0.644	0.539	0.242	0.012	0.421	0.611
Fotosíntesis 14dde	0.077	0.001	0.033	0.083	0.066	0.027	0.199	0.068	0.018	0.211		0.000			0.113	0.629	0.179	0.285
Fotosíntesis 33dde	0.020	0.002	0.010	0.337	0.239	0.003	0.158	0.001	0.060	0.591	0.088				0.001	0.229	0.090	0.641
Clorofila 10 dde	0.240	0.852	0.084	0.022	0.325	0.740	0.086	0.475	0.828	0.023				0.026	0.644	0.175		0.325
Clorofila 20 dde	0.221	0.157	0.832	0.076	0.003	0.025	0.011	0.201	0.059	0.318			0.055		0.966	0.549		0.133
Agua transpirada en prueba	0.000	0.072	0.000	0.001	0.784	0.000	0.485	0.000	0.018	0.009	0.362	0.235	0.008	0.689		0.570	0.293	0.258
EUA	0.211	0.030	0.036	0.775	0.394	0.943	0.048	0.320	0.550	0.300	0.212	0.684	0.181	0.032	0.275		0.179	0.318
CRA	0.307	0.661	0.239	0.321	0.847	0.688	0.248	0.201	0.371	0.127	0.749	0.959			0.398	0.160		0.780
Proteína	0.001	0.000	0.001	0.102	0.004	0.000	0.010	0.000	0.000	0.661	0.008	0.001	0.588	0.045	0.000	0.430	0.511	

Los valores sobre las casillas gris corresponden a p-value de coeficientes de correlación bajo riego óptimo, los valores bajo las casillas gris corresponden a p-value de coeficientes de correlación bajo riego limitado. Los p-value <0.05 denotan significancia de la correlación obtenida y p-value <0.01 denota alta significancia de la correlación obtenida sombreados en rojo.

Anexo 4: Tabla de coeficiente de correlación de Pearson y p-value del coeficiente de correlación de el rendimiento óptimo (Yp), rendimiento bajo riego limitado (Ys) y los indicadores (MP, GMP, STI, TOL, SSI, MSI) de tres genotipos de trigo (*T. aestivum* L.) bajo condiciones de La Molina.

		Yp	Ys	Clase I			Clase II		MSI
				MP	GMP	STI	TOL	SSI	
<b>Yp</b>	r	1							
	p	-							
<b>Ys</b>	r	0.53	1						
	p	0.646	-						
<b>MP</b>	r	0.94	0.78	1					
	p	0.213	0.433	-					
<b>GMP</b>	r	0.91	0.84	1.00	1				
	p	0.276	0.370	0.063	-				
<b>STI</b>	r	0.93	0.81	1.00	1.00	1			
	p	0.248	0.398	0.035	0.028	-			
<b>TOL</b>	r	0.85	0.01	0.63	0.56	0.59	1		
	p	0.350	0.995	0.562	0.625	0.598	-		
<b>SSI</b>	r	0.56	-0.40	0.26	0.17	0.21	0.91	1	
	p	0.618	0.736	0.831	0.894	0.866	0.269	-	
<b>MSI</b>	r	-0.46	-1.00	-0.73	-0.79	-0.76	0.07	0.47	1
	p	0.696	0.050	0.483	0.420	0.448	0.955	0.686	-

El número superior corresponde al coeficiente de correlación de Pearson (r) y el número inferior corresponde al valor de significancia p-value (p). Yp: Rendimiento bajo riego óptimo, Ys: Rendimiento bajo riego limitado, MP: productividad media, GMP: productividad geométrica media, STI: índice de tolerancia al estrés, TOL: índice de tolerancia, SSI: índice de susceptibilidad al estrés, MSI: índice de puntuación múltiple,.

Anexo 5: Pasos para obtener el MSI a través de puntuaciones asignadas a los indicadores de tolerancia al estrés hídrico (Mohammadi 2019).

1) Hallar los indicadores MP, GMP, STI, TOL y SSI según Mohammadi 2019 y Ahakpaz *et al.* 2020. Determinar el valor máximo y mínimo para cada indicador entre los genotipos estudiados, y calcular la diferencia entre ellos. Dividir entre 10 la diferencia dado que se consignarán puntuaciones del 1 al 10 a los indicadores. El resultado de la división genera el segmento que compone cada puntuación. Por ejemplo, en este estudio los valores fueron:

	Clase I			Clase II	
	MP	GMP	STI	TOL	SSI
Máximo	2.24	2.16	0.87	1.20	1.20
Mínimo	1.64	1.58	0.47	0.43	0.59
Diferencia	0.60	0.58	0.40	0.77	0.61
<b>Segmento</b>	<b>0.060</b>	<b>0.058</b>	<b>0.040</b>	<b>0.077</b>	<b>0.061</b>

2) Para determinar las puntuaciones en el caso de los indicadores de Clase I se considera al máximo como el valor inicial por ser el más deseable y se procede a restarle el segmento calculado, en los indicadores de Clase II se invierte la puntuación considerando al mínimo como el valor inicial por ser el más deseable y se procede a sumarle el segmento calculado. Por ejemplo, STIs es 1 para los valores de STI comprendidos entre 0.87 y 0.830.

	Clase I - STI									
Rangos de STI	<b>0.87-</b> 0.830	0.830- 0.790	0.790- 0.750	0.750- 0.710	0.710- 0.670	0.670- 0.630	0.630- 0.590	0.590- 0.550	0.550- 0.510	0.510- <b>0.47</b>
Puntuaciones (STIs)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Clase II - SSI									
Rangos de SSI	<b>0.59-</b> 0.651	0.651- 0.712	0.712- 0.773	0.773- 0.834	0.834- 0.895	0.895- 0.956	0.956- 1.017	1.017- 1.078	1.078- 1.139	1.139- <b>1.20</b>
Puntuaciones (SSIs)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

3) El índice de puntuación múltiple (MSI) se obtiene del promedio de las puntuaciones asignadas a los indicadores. Por ejemplo, el MSI calculado para el genotipo G2 es 4.2.

Maceta	Clase I			Clase II		MSI
G2	MP	GMP	STI	TOL	SSI	
	1.86	1.84	0.63	0.43	0.59	
	MPs	GMPs	STIs	TOLs	SSIs	
7	6	6	1	1	4.2	