

## Utilización de los índices de selección en la identificación de genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.) tolerantes a sequía

Elizabeth Heros Aguilar<sup>1</sup>, Luz Gómez Pando<sup>1</sup>, Guillermo Sosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Cereales y Granos Nativos. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú; email: lizheros@lamolina.edu.pe

<sup>2</sup> Programa Nacional de Agro-economía y Biometría. Subdirección de Apoyo Tecnológico Agrario. Dirección de Extensión Agraria. Instituto Nacional de Innovación Agraria. Lima, Perú.

**Recepción:** 2014-01-08

**Aceptación:** 2014-02-10

### Resumen

Doce genotipos de arroz fueron estudiados en condiciones de campo, en condiciones inundadas y en ambientes de sequía moderada y severa. Se utilizó el diseño de parcelas divididas con dos repeticiones, ubicando en parcelas los tratamientos de manejo de riego (tres) y en sub-parcelas los genotipos (12), con una separación de diez metros para controlar la filtración lateral.

La siembra directa se realizó en hileras, utilizando una densidad de 80 Kg ha<sup>-1</sup>. El rendimiento en grano se ajustó a 14 % de humedad. Para cada genotipo se determinó la tolerancia a sequía utilizando los siguientes índices de selección: Índice de Susceptibilidad al Estrés (ISE), Productividad Media Geométrica (PMG), Productividad Media (PM), Media Armónica (MA), Índice de Tolerancia al Estrés (ITE), Índice de Rendimiento (IR), Índice de Estabilidad de Rendimiento (IER) e Índice de Resistencia a Sequía (IRS).

Se observaron diferencias significativas entre rendimientos en condiciones de inundación y estrés en los índices Productividad Media Geométrica (PMG), Media Armónica (MA) y Productividad Media (PM). Los coeficientes de correlación indican que estos índices podrían ser utilizados para la identificación de genotipos de arroz tolerantes a sequía. Los análisis de los gráficos tridimensionales indican que IR71706 es el genotipo más tolerante a sequía y puede sembrarse en condiciones de riego y aridez.

**Palabras clave:** *Oryza sativa* L., sequía, potencial de rendimiento, inundación, índices de selección, gráficos tridimensionales.

### Abstract

Twelve rice genotypes were studied in field conditions, in flooded conditions and in moderate and severe drought environments. Split-parcel design with two repetitions was used, locating in parcels the treatment irrigation managements (three) and in sub-parcel the genotypes (twelve), with a separation of ten meters for controlling the lateral filtration.

Direct seeding was done in rows, using a density of 80 Kg. ha<sup>-1</sup>. Yield in grain was adjusted to 14 % of moisture. For each genotype was determined the tolerance to drought using the following selection indexes: Stress Susceptibility Index (SSI), Geometric Mean Productivity (GMP), Mean Productivity (MP), Harmonic Mean (HM), Stress Tolerance Index (STI), Yield Index (YI), Yield Stability Index (YSI), and Index of Drought Resistance (IDR).

Significant differences were observed between yield in drought conditions and stress in the Geometric Mean Productivity (GMP), Harmonic Media (HM), and Mean Productivity (MP). The correlation coefficients indicate that these indexes could be used to identify rice genotypes tolerant to drought. The analysis of tridimensional graphics indicate that IR71706 is the most tolerant genotype to drought, and can be sown in irrigation conditions and dryness.

**Key words:** *Oryza sativa* L., drought, yield potential, flood, selection index, tridimensional graphics

## 1. Introducción

La variación climática es el estrés de mayor impacto para la producción de arroz porque reduce significativamente sus rendimientos y con frecuencia induce a pérdidas de cosecha (Jaleel *et al.*, 2009). A nivel mundial, por efecto de la sequía se estima que la disponibilidad de agua para la agricultura será restringida (Boyer, 2010). En el cultivo de arroz, el sector irrigado dispondría de menos agua y de menor superficie sembrada, reduciendo la producción e inestabilizando la soberanía alimentaria (Wassmann *et al.*, 2009). El cambio climático incrementará la frecuencia y severidad del estrés abiótico. Los estiajes serán más frecuentes (Mackill *et al.*, 2012).

La sequía afecta el crecimiento y desarrollo reflejándose en mermas de rendimiento. La estabilidad de los sistemas de producción de arroz en las áreas tropicales dependerá de estrategias futuras de adaptación y de medidas de mitigación para enfrentar el estrés hídrico (Jaleel *et al.*, 2009; Lansigan, 2004).

El arroz está considerado como una planta sensitiva a la sequía, especialmente en la fase reproductiva (Kato *et al.*, 2008), siendo la mayoría de los cultivares sembrados en condiciones de riego susceptibles a la falta de agua (Lafitte *et al.* 2006). La sequía reduce la tasa fotosintética, disminuyendo la producción de biomasa y el índice de cosecha, incrementando la esterilidad de los granos

(Guam *et al.*, 2010). En estas condiciones, el número de granos llenos por panícula y el peso de 1 000 granos disminuye (Cha-Um *et al.*, 2010).

En la selección de genotipos tolerantes a sequía se ha determinado que la resistencia en la fase reproductiva está relacionada al tamaño del sink y distribución de fotosintatos. La selección en la fase vegetativa tiene más relación en el tamaño de la fuente: producción de biomasa, número de panículas fértiles y altura de planta (Guam *et al.*, 2010). Para tamizar poblaciones es preferible sequía severa en la fase vegetativa y reproductiva.

La mayoría de los cultivares de riego no tienen tolerancia a sequedad. Un enfoque de mejoramiento sería desarrollar poblaciones retrocruzadas y seleccionar genotipos superiores en condiciones de estrés (Lafitte *et al.*, 2006). El uso de donadores que combinen altos rendimientos, tanto para sequía como para inundación, probablemente producirían cultivares mejorados para este tipo de ambientes. (Kumar *et al.*, 2000). Tecnologías de ahorro de agua son requeridas para estos cultivares. (Lao, 2010).

El arroz en el Perú es un cultivo de gran importancia económica y social. El promedio de la producción en el periodo 2001-2010 fue de 2 800 000 t (MINAG 2012), que ha permitido reducir las importaciones y mejorar la seguridad alimentaria. Los

rendimientos en el sector de riego están entre los más altos del mundo, siendo los valles de la costa norte los de mayor rendimiento (8.2 t ha<sup>-1</sup>). El 93% de la producción se obtiene en el agro-ecosistema de riego, aportando la costa el 62% y la selva alta el 38% (MINAG 2012). Actualmente, el arroz es la fuente de energía más barata y su consumo *per- cápita* está en incremento, estimándose en 64 Kg. (MINAG 2013). Es un cultivo de pequeños y medianos agricultores y más de 120 000 se dedican a la siembra de arroz.

Los incrementos de producción para satisfacer las demandas futuras se obtendrían por mayor número de hectáreas en el sector de riego, y por el mejoramiento de la productividad. El manejo del agua de riego se da por inundación continua, mientras que el consumo varía de 12 000 a 20 000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, por campaña.

En la costa son frecuentes los años secos (descarga de los ríos inferior al promedio anual), lo que no permite sembrar arroz en las áreas comunes, bajando la producción. La competencia por el agua con otros cultivos (agro-exportación, producción de etanol), el consumo urbano e industrial y el decremento de los embalses de los reservorios no permitirían en el futuro siembras de arroz por el sistema de inundación, indicándose que los cultivares actuales en siembra no son tolerantes a déficit de agua y la producción estaría muy restringida.

En selva alta, los cambios en las épocas, frecuencia e intensidad de las precipitaciones modificarían las épocas de siembra exponiendo a las cosechas a épocas inadecuadas. En esta área, la siembra de cultivares tardíos sin tolerancia a sequía limitaría la expansión del cultivo por la inadaptación al cambio climático. La incorporación de nuevas áreas se realizaría por bombeo (aumentando costos de producción) y con nuevo tipo varietal.

En este estudio se evalúan la reacción a agostamiento de doce cultivares de arroz en condiciones de inundación y sequía, utilizándose los índices de selección de tolerancia a esta última para identificar los genotipos más tolerantes al estrés hídrico.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Material genético

Para este estudio se tomaron doce genotipos seleccionados de ensayos previos tolerantes a sequía. Se incluyeron cuatro líneas desarrolladas para ambientes de riego por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), cuatro genotipos para ambientes de secano y cuatro para ambientes aeróbicos desarrollados por el International Rice Research Institute (IRRI).

El ambiente aeróbico se define como un manejo de riego, similar al manejo de maíz y trigo. Como testigos se incluyeron los cultivares de riego La Conquista, La

Esperanza y Capirona, que se siembran en las condiciones de selva alta y Ecoarroz, que es un cultivar de secano que se siembra en los barriales amazónicos del Perú (figura 1). Los cultivares sembrados en selva alta fueron eliminados al final del estudio por su alta susceptibilidad a sequía.

## 1.2 Diseño experimental

Se utilizó el diseño experimental de parcelas divididas con dos repeticiones, colocándose los tratamientos en parcelas y los genotipos en sub-parcelas.

Los tratamientos fueron:

- T1= Inundación continua, con una lámina de agua de 5 a 10cm de espesor, desde los 30 días después de la siembra a maduración fisiológica.
- T2= Sequía inducida por periodo de 10 días (a partir de los 15 días, después del inicio del periodo floral).
- T3= Sequía inducida por periodo de 15 días (a partir de los 15 días, después del inicio del periodo floral).

En la fase reproductiva de los tratamientos T2 y T3 las parcelas fueron drenadas y los riegos de recuperación se aplicaron con 10cm de espesor después de los periodos de sequía. Los tratamientos en las repeticiones tuvieron una separación de 5m y cada parcela tuvo un contorno sembrado de 1m (a ambos lados) para atenuar la filtración lateral. Las sub-parcelas tuvieron 6 hileras a 25cm de separación y 5m de largo. Entre las sub-parcelas hubo una hilera sin sembrar.

**Figura 1. Relación de genotipos de arroz**

<b>Línea</b>	<b>Designación</b>	<b>Adaptación</b>	<b>Origen<sup>(1)</sup></b>
1	PCT 6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-2-5M	Riego	CIAT - Colombia
2	PCT 6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-3-19M	Riego	CIAT - Colombia
3	PCT 6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-2-3-M	Riego	CIAT - Colombia
4	BP266-EM-3JUMBU/C101-A51	Secano	IRRI - Filipinas
5	IR71706-136-3-2-3	Secano	IRRI - Filipinas
6	IR78948-B-21-B-B-B	Secano	IRRI - Filipinas
7	TB177E-TB-28-B-3	Secano	IRRI - Filipinas
8	IR82310-B-B67-2	Aeróbico	IRRI - Filipinas
9	IR82859-B-B-93-2	Aeróbico	IRRI - Filipinas
10	IR 78933-B-24-B-B-B	Aeróbico	IRRI - Filipinas
11	IR 78933-B-24-B-B-4	Aeróbico	IRRI - Filipinas
12	PNA/1005-F4-74-1 (Ecoarroz)	Secano	INIA-Perú

CIAT= Centro Internacional de Agricultura Tropical

IRRI= Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz

INIA= Instituto Nacional de Innovación Agraria

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.3 Manejo agronómico

La siembra se realizó en suelo seco con una densidad de 80 Kg de semilla ha<sup>-1</sup>. La fertilización fue de 160-60-60. Durante el desarrollo del cultivo se realizaron aplicaciones de insecticidas para controlar *Chironomus* sp. e *Hydrellia wirthii*, que se presentaron en la fase vegetativa. No se hicieron aplicaciones para control de enfermedades. La cosecha se realizó en un área neta de 2m<sup>2</sup> por sub-parcela. Los rendimientos se ajustaron a 14% de humedad.

### 2.4 Análisis estadísticos

Los rendimientos se analizaron con los procedimientos del modelo lineal del software SAS. Las correlaciones entre rendimiento potencial y estrés hídrico con el software libre "R". Los análisis multivariados como Biplot, Cluster, Tridimensional fueron determinados usando también SAS.

La tolerancia al agostamiento se determinó para cada genotipo utilizando los índices de selección para sequía. El rendimiento potencial en grano del tratamiento T1 y el rendimiento en sequía T3 se correlacionó con las ecuaciones de índice de selección que se indican en la figura 2.

- **Suelos**

El ensayo se ubicó en un suelo franco arcilloso con pH 7.54, bajo en materia orgánica (1.91 %); con contenido de fósforo de 3.7 ppm y de potasio de 1.83 ppm.

- **Temperatura**

El promedio de la temperatura durante el periodo de estudio fue de 26.9°C y la precipitación mensual de 27mm, con un promedio de siete días de lluvia.

- **Coordenadas**

Las coordenadas de la parcela experimental fueron: 5°42'52.25" S y 78°47'24. 23" O en la Provincia de Jaén.

- **Índices de selección a sequía**

Varios mejoradores han utilizado en diferentes cultivos los índices de selección para identificar genotipos tolerantes a sequía. En maíz (Majid *et al.*, 2010; Almadezahneh *et al.*, 2011), en frijol (Kristin, *et al.*, 1997), en arroz (Roman *et al.*, 2012), en girasol (Darvishzadeh *et al.*, 2010), etc. Los índices más usados se indican en la figura 2.

**Figura 2. Índices de tolerancia a sequía para identificación de genotipos en condiciones de ambiente favorable y estrés hídrico**

**1. Índice susceptibilidad al estrés**

$$SSI = \frac{1 - \left(\frac{Y_S}{Y_P}\right)}{1 - \left(\frac{\bar{Y}_S}{\bar{Y}_P}\right)}$$

Fisher and Maurer (1978)

**2. Productividad media geométrica**

$$GMP = \sqrt{(Y_S)(Y_P)}$$

Fernández (1992) and Kristin *et al.*, (1997)

**3. Productividad media**

$$MP = \frac{Y_S + Y_P}{2}$$

Rossielle and Hambling (1981)

**4. Media armónica**

$$HM = \frac{2(Y_P * Y_S)}{Y_P + Y_S}$$

$\bar{Y}_S$  y  $\bar{Y}_P$  = Promedio de rendimiento de todos los genotipos en sequía e inundación

$Y_S$  y  $Y_P$  = Rendimiento en sequía e inundación de un genotipo dado.

**5. Índice de Tolerancia al estrés**

$$STI = \frac{(Y_S)(Y_P)}{(\bar{Y}_P)^2}$$

Fernández (1992)

**6. Índice de rendimiento**

$$YI = \frac{Y_S}{\bar{Y}_S}$$

Gavuzzi *et al.*, (1997)

**7. Índice de estabilidad de rendimiento**

$$YSI = \frac{Y_S}{Y_P}$$

Bousslama and Schapaugh (1984)

**8. Índice de resistencia a sequía**

$$DRI = (Y_S/Y_n)/(M_s/M_n)$$

**Fuente:** Jafari *et al.*, (2009)

### 3. Resultados y Discusión

Los análisis de variancia de las respuestas genotípicas muestran confiabilidad (figura 3).

**Figura 3. Análisis de variancia de genotipos de arroz cultivados en condiciones de inundación y estrés hídrico. Jaén 2011 A**

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F observado	Tabla F 5%
Repeticiones	1	0,59753918	0,59753918	9,61	0,0902
Tratamientos	2	5,80695321	2,9034766	46,69	0,021
Error (a)	2	0,12436442	0,0218221		
Variedades	11	3,19163558	0,29014869	7,08	< 0.0001
Trat x var.	22	0,84542479	0,0384284	0,94	0,5545
Error (b)	33	1,31084907	0,040964		
Total corregido	70	11,89575575			

CV= (%) Tratamientos = 19.78 , Genotipos=16.06

**Fuente:** Elaboración propia

Entre tratamientos, los rendimientos en condiciones de inundación (T1) y estrés moderado (T2) existen diferencias, pero no son significativas. Entre T1 y estrés severo (T3) las diferencias sí son importantes. Para los análisis de tolerancia se tomó el rendimiento de T1, como rendimiento potencial y el

rendimiento de T3 como rendimiento en sequía, para identificar donadores con alta tolerancia a la misma (Ouk *et al.*, 2008). Los periodos de sequedad se aplicaron solo en la fase reproductiva, que es más sensitiva que la fase vegetativa (Kamoshita, *et al.*, 2008; Kato, *et al.*, 2008).



**Figura 4. Rendimiento en grano de los tratamientos inundado y estrés hídrico en Kg ha<sup>-1</sup>**

Tratamientos	Rendimiento (Kg ha <sup>-1</sup> )	Duncan (0.05%)
Inundación (T1)	7,945	a
Seca 10 días (T2)	6,483	b
Seca 15 días (T3)	4,486	c

<sup>(1)</sup> Rendimientos con una misma letra no son significativos entre sí. Duncan (0.05%)

**Fuente:** Elaboración propia

El coeficiente de variabilidad para los tipos de estudios en condiciones de campo tratamientos fue de 19.78%, lo que se ubica en los rangos de aceptabilidad para este (Farshadfar, *et al.*, 2008).

**Figura 5. Rendimiento en grano de los genotipos en estudio en Kg ha<sup>-1</sup> ajustado 14% de humedad. Prueba de significación Duncan al 0.05%. Rendimientos con una misma letra no son significativos entre sí**

Cultivar	Rendimiento Kg ha <sup>-1</sup>	Duncan 0.05			
IR 71706-136-3-2-3	8,627	a			
IR 78948 -B-21-B-B-B	7,134	b			
PCT-6/0/0/0 >19-1-4-3-1-1-1-2-5-M	7,096	b			
PCT-6/0/0/0 >19-1-4-3-1-1-1-3-19-M	6,943	b			
PCT-6/0/0/0 >19-1-4-3-1-1-1-2-3-M	6,634	b	c		
Ecoarroz (test)	6,433	b	c	d	
IR78933 -B-24-B-B-4	6,319	b	c	d	
IR 82589 -B-B-93-2	6,145	b	c	d	e
IR 82310 -B-B67-2	5,498		c	d	e f
IR 78937 -B-4-B-B-B	5,237			d	e f
TB 177 E -TB-28-B-3	4,887				e f
BP 266 E-EM-3-JUMBU/C101-A-51	4,813				f

**Fuente:** Elaboración propia

Para rendimiento de genotipos (figura 5), en la prueba Duncan al 0.05 se observa que la línea IR71706-3-2-3 alcanza un rendimiento de 8.6 t ha<sup>-1</sup>, significativamente superior a las otras once líneas. Los tres genotipos siguientes (IR78948-B-B-B, PCT6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-2-5M y PCT6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-2-19M) alcanzan altos rendimientos sin significación estadística entre ellos. Otro grupo de cinco líneas alcanza rendimientos satisfactorios sin significación. La línea BP266E-EM tiene el rendimiento más bajo con 4.8 t ha<sup>-1</sup>, siendo superado por todas las líneas (figura 5). El testigo Ecoarroz, con 6.4 t ha<sup>-1</sup> fue superado por cinco líneas de mayor rendimiento y significativamente solo por IR 71706-136 (8.6 t ha<sup>-1</sup>).

Existen diferencias características entre los rendimientos de los genotipos en condiciones de inundación permanente (Yp) y estrés hídrico (Ys) (figura 6). Los coeficientes de variación experimental fluctuaron de 14.1 a 29.5%, alcanzando los índices de productividad media geométrica los valores más bajos (15.7%), productividad media (14.3%), media armónica (17.5), no superiores a 18% (figura 6).

Para la identificación de genotipos tolerantes a sequía se utilizaron los rendimientos de los genotipos obtenidos en inundación como rendimiento potencial (Yp) y los rendimientos obtenidos en sequía severa (Ys), obteniéndose

los valores de los índices de selección con las ecuaciones que se indican en la figura 2.

En todos los índices de selección se observan diferencias, a excepción de los índices de susceptibilidad al estrés (ISE), índice de estabilidad de rendimiento (IER) e índice de resistencia a sequía (IRS), en que las diferencias no son significativas (figura 7). Estas respuestas sugieren que existe variabilidad genética entre los genotipos y que pueden utilizarse como material para seleccionar genotipos tolerantes a sequía (figura 7).

Los rendimientos más altos en condiciones inundadas y estrés fueron alcanzados por la línea (IR71706 con 1.956 y 1.493 Kg por sub-parcela de 2 m<sup>2</sup>. El mayor valor de PMG (1.709), de PM (1.725), de MA (1.693) y de ITE (1.187) fue alcanzado por el genotipo IR71706 con alta correlación entre los rendimientos en inundación (Yp) y estrés hídrico (Ys).

Para identificar el mejor índice de selección para los genotipos tolerantes a sequía se determinaron correlaciones entre los rendimientos de inundación (Yp) y estrés hídrico (Ys).

La matriz de correlación (figura 8), indica que PMG, PM, MA, ITE, IR, IER e IRS pueden ser utilizados para seleccionar genotipos resistentes a sequedad.

Los índices más adecuados para identificar genotipos tolerantes a sequía en arroz fueron Productividad Media que selecciona los genotipos IR71706-136-3-2-3, PCT-6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-1-2-3-M y Ecoarroz. Productividad Media Geométrica, selecciona los mismos genotipos con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.93$ . Índice de Tolerancia al Estrés, selecciona los mismos genotipos, así como media armónica. Estos mismos índices PM, PMG e ITE han sido identificados para arroz por Abarshahi *et al.*, 2011.

De acuerdo a estos resultados, los genotipos IR71706-136-3-2-3, PCT-6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-1-2-3-M son los más tolerantes al estrés hídrico. La matriz de correlación entre los índices de selección a sequía y los rendimientos de los tratamientos en condiciones de inundación (T1) y estrés hídrico (T3), indica que T3 es negativo con índice de susceptibilidad al estrés (ISE) y positivo con los demás índices de selección (figura 8). Los rendimientos en sequía están más estrechamente asociados con los índices: Media Armónica, índice de Tolerancia al Estrés, Productividad Media Geométrica y Productividad Media.

**Figura 6. Cuadrados medios de rendimiento de genotipos de arroz bajo condiciones óptimas condiciones de estrés y cálculo de diferentes índices de tolerancia a sequía**

Fuente de variación	Grados de libertad	T1 <sup>(1)</sup>	T3 <sup>(2)</sup>	ISE <sup>(3)</sup>	PMG <sup>(4)</sup>	PM <sup>(5)</sup>	MA <sup>(6)</sup>	ITE <sup>(7)</sup>	IR <sup>(8)</sup>	IER <sup>(9)</sup>	IRS <sup>(10)</sup>
Repetición	1	0.486**	0.040 ns	0.001 ns	0.148 ns	0.201**	0.107 ns	0.021ns	0.000 ns	0.019ns	0.001ns
Genotipo	11	0.115 ns	0.152 *	0.171 ns	0.128*	0.112*	0.145*	0.124*	0.188*	0.032ns	0.101ns
Error	11	0,05	0,036	0,072	0,035	0,032	0,039	0,03	0,044	0,014	0,043
CV (%)		14,1	21,1	26,8	15,7	14,3	17,5	29,5	20,9	20,6	20,9

<sup>(1)</sup>= Rendimiento del genotipo en condiciones óptimas (potencial), <sup>(2)</sup> T3 Rendimiento de un genotipo dado en condiciones de estrés, <sup>(3)</sup>

ISE= índice de susceptibilidad al estrés <sup>(4)</sup> PMG=Productividad media geométrica, <sup>(5)</sup> Productividad media, <sup>(6)</sup> media armónica, <sup>(7)</sup> Índice de tolerancia al estrés,

<sup>(8)</sup> Índice de rendimiento <sup>(9)</sup> índice de estabilidad de rendimiento <sup>(10)</sup> Índice de resistencia al estrés.

CV= Coeficiente de variación

\* y \*\* significativa al nivel de probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente, ns= no significativa en el nivel de probabilidad de 0.05.

**Fuente:** Elaboración propia

Figura 7. Rendimiento promedio de genotipos de arroz en condiciones de inundación y estrés, y cálculo de diferentes índices de tolerancia a sequía. Rendimiento por sub-parcela en Kg (área de 2m<sup>2</sup>). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes, según prueba Duncan 0.05

Genotipo	T1	T3	ISE	PMG	PM	MA	TTE	IR	IER	IRS
1	1,716 B A C	0,946 B C	1,054 B D A C	1,270 B A C	1,331 B A C	1,213 B C	0,639 B C D	1,048 B C	0,551 B A C	0,979 B A
2	1,633 B A C	0,859 B C D	1,148 B A C	1,194 B D C	1,261 B D C	1,130 B D C	0,561 B C D	0,948 B C D	0,508 B C	0,901 B A
3	1,804 B A	0,951 B C	1,116 B D A C	1,309 B A C	1,378 B A C	1,243 B A C	0,673 B C	1,051 B C	0,521 B A C	0,924 B A
4	1,265 B C	0,664 C D	0,962 B D A C	0,907 D C	0,964 D C	0,854 D C	0,323 C D	0,740 C D	0,576 B A C	1,004 B A
5	1,956 A	1,493 A	0,551 D C	1,709 A	1,725 A	1,693 A	1,187 A	1,666 A	0,764 B A	1,354 A
6	1,623 B A C	1,295 B A	0,465 D	1,450 B A	1,459 B A	1,440 B A	0,840 A B	1,443 B A	0,799 A	1,410 A
7	1,233 C	0,467 D	1,408 A	0,757 D	0,850 D	0,675 D	0,226 D	0,520 D	0,390 C	0,684 B
8	1,257 B C	0,856 B C D	0,739 B D C	1,035 B D C	1,056 B D C	1,015 B D C	0,458 B C D	0,963 B C D	0,677 B A C	1,190 B A
9	1,709 B A C	0,871 B C D	1,144 B A C	1,219 B C	1,290 B C	1,152 B D C	0,592 B C D	0,968 B C D	0,509 B C	0,902 B A
10	1,428 B A C	0,660 C D	1,236 B A	0,956 D C	1,044 B D C	0,880 D C	0,413 B C D	0,749 C D	0,458 C	0,797 B
11	1,796 B A	0,771 C D	1,315 B A	1,176 B D C	1,284 B D C	1,078 B D C	0,545 B C D	0,857 C D	0,432 C	0,761 B
12	1,622 B A C	0,939 B C	0,923 B D A C	1,230 B C	1,281 B D C	1,181 B C	0,601 B C D	1,049 B C	0,596 B A C	1,045 B A

Fuente: Elaboración propia



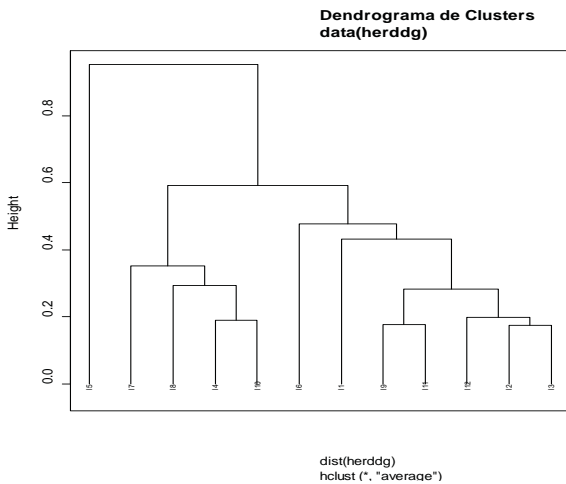
**Figura 8. Correlación entre diferentes de tolerancia a sequía y el rendimiento medio de genotipos de arroz bajo condiciones de inundación y estrés hídrico**

Índices	Yp	Ys	Índice de Susceptibilidad al Estrés	Productividad Geométrica Media	Productividad Media	Media armónica	Índice de Tolerancia al Estrés	Índice de Resistencia	Índice de Estabilidad de Rendimiento
Ys	0.6888814								
Índice de Susceptibilidad al estrés	-0.1875563								
Productividad Media Geométrica	0.8580543	-0.8286317	-0.658018						
Productividad Media	0.9069034	0.9628528	-0.5766021	0.9942484					
Media armónica	0.8118767	0.93011656	-0.7174577	0.9963981	0.9816135				
Índice de Tolerancia al Estrés	0.8064734		-0.6899738	0.9852495	0.9740643	0.9869402			
Índice de Resistencia	0.6800042		-0.8346336	0.9591715	0.9255382	0.9785592	0.9716361		
Índice de Estabilidad de Rendimiento	0.2133361		-0.9992796	0.67846	0.5983928	0.7366197	0.7079253	0.8490857	
Índice de Resistencia al Estrés	0.2343774		-0.9977693	0.6947212	0.6158484	0.7517524	0.7225366	0.8603591	0.9995789

Fuente: Elaboración propia

En el dendrograma del análisis Cluster, la línea IR71706 alcanza el mayor rendimiento en condiciones de inundación y estrés moderado y severo. Las líneas del segundo grupo tienen respuesta intermedia y el tercer grupo rendimientos bajos, es decir son susceptibles al estrés hídrico (figura 9).

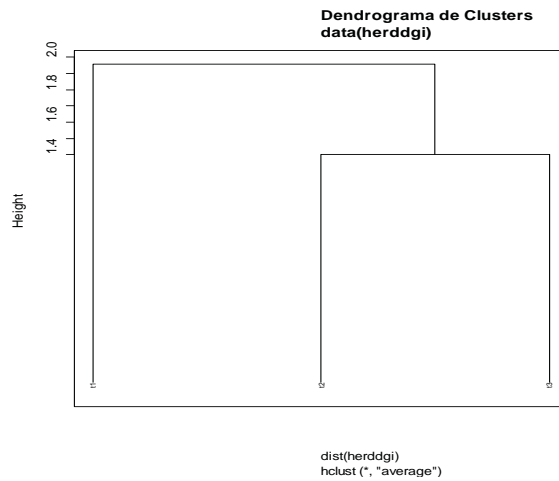
**Figura 9. Dendrograma de análisis Cluster de genotipos basados en índices de tolerancia y sequía y rendimiento en grano en condiciones inundadas y estrés (Codificación de los genotipos en la figura 1)**



**Fuente:** Elaboración propia

Para los tratamientos, el dendrograma muestra alta respuesta para inundación, intermedia para T2 y baja para T3 (figura 10).

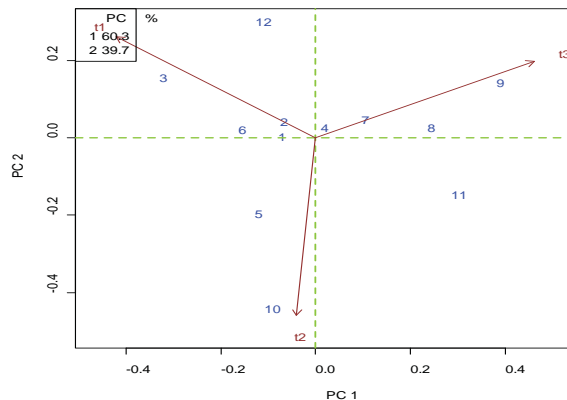
**Figura 10. Dendrograma de análisis Cluster para tratamientos T1, T2 y T3**



**Fuente:** Elaboración propia

En los análisis gráficos AMMI se observa que las líneas más estables son la 4, 1, 2, 6 y 7. Las líneas restantes por estar alejadas del eje central son menos estables en rendimiento, mostrando comportamientos variables al estrés hídrico.

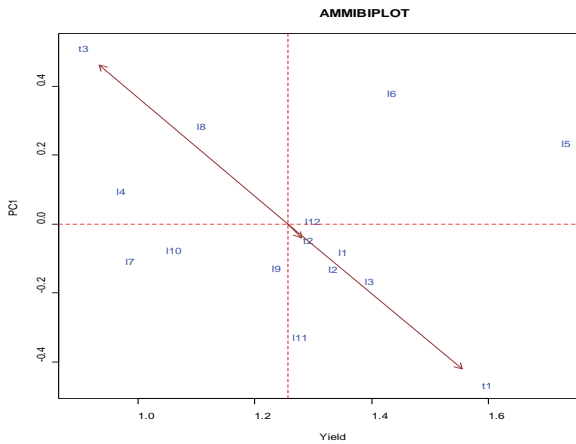
**Figura 11. Gráficos AMMI para tratamientos y genotipos de arroz**



**Fuente:** Elaboración propia

En el gráfico AMMI-Biplot, entre el rendimiento y el Componente Principal 1, indica que los genotipos IR71706-136-3-2-3 (5), IR78948-B-21-B-B-B (6), PCT-6/0/0/0>19-1-4-3-1-1-1-2-5-M (1), PCT-6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-2-3-M (3) y Ecoarroz (12) son de mayor rendimiento y que las líneas BP266E-EM-3JUMBU/C101-A-51 (4), TB177E-TB-28-B-3 (7), IR78937-B-4-B-B-B (10) y IR82310-B-B67-2 (8) son las de más bajo índice (figura 12).

**Figura 12. Análisis AMMI-BIPLLOT para genotipos de arroz en condiciones de inundación y sequía**



**Fuente:** Elaboración propia

En las condiciones de inundación (T1) es el ambiente donde los genotipos alcanzan los mayores rendimientos y en las condiciones de sequía severa (T3), los rendimientos son los más bajos. En ambientes de sequía moderada

(T2), los rendimientos son intermedios (figura 12). Para identificar las relaciones entre los rendimientos de inundación, rendimientos en sequía y adecuados índices de selección, se emplearon gráficos tridimensionales para cada índice. Estos gráficos muestran la habilidad de estos índices para detectar grupos (Fernández, 1992).

Los gráficos tri-dimensionales clasificarían los genotipos en cuatro grupos:

- Grupo A: Genotipos que producen altos rendimientos en ambientes de inundación y de estrés
- Grupo B: Genotipos con altos rendimientos en inundación
- Grupo C: Genotipos con altos rendimientos en estrés
- Grupo D: Genotipos con bajos rendimientos en inundación y en estrés

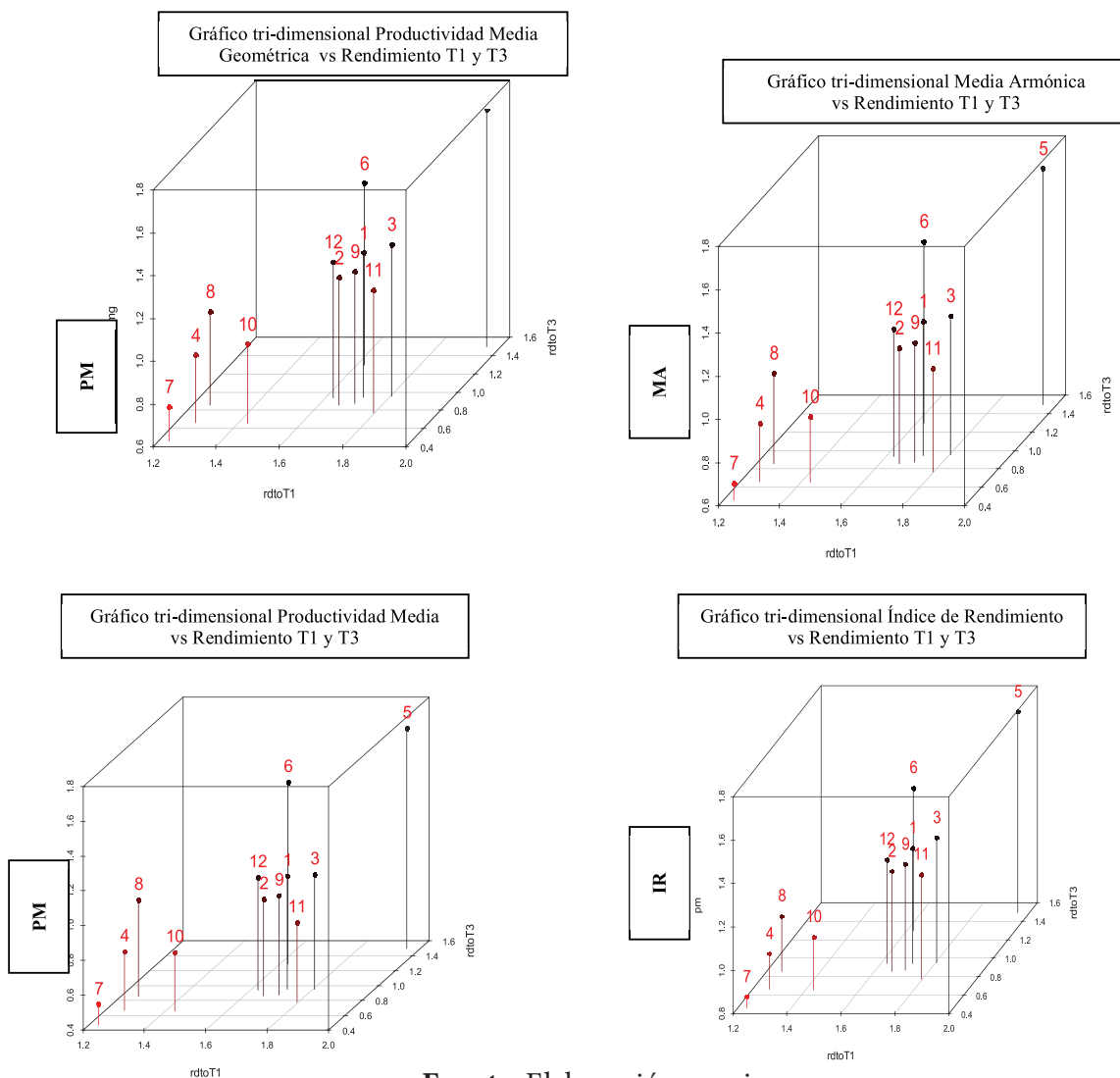
Un índice adecuado debe separar los genotipos del grupo A de los otros grupos.

Los gráficos tri-dimensionales correspondientes a los índices de Productividad Media Geométrica indican que los genotipos IR71706-136-3-2-3, IR78948-B-B-B y PCT6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-2-3-M, tienen tolerancia a sequía y muestran superioridad uniforme en ambientes de inundación y estrés (figura 13).

El gráfico de productividad media selecciona los mismos genotipos. El gráfico de media armónica identifica los mismos genotipos

como los de mejor comportamiento en ambientes de inundación y estrés. El gráfico tridimensional de índice de rendimiento, también identifica los mismos genotipos.

**Fig. 5 Gráficos tridimensionales de Potencial de Rendimiento ( $Y_p$ ), Rendimiento en Estrés ( $Y_s$ ) y Productividad Media Geométrica (PMG), Productividad Media (PM), Media Armónica (MA), Índice de Rendimiento (IR) para los genotipos de arroz. Genotipos codificados, ver figura 1**



Fuente: Elaboración propia



#### 4. Conclusiones

Los coeficientes de variabilidad (CV) para rendimiento de los genotipos en condiciones de inundación y estrés fueron de 19.78% para tratamientos y de 16.06% para genotipos. Estos valores son aceptables para estos tipos de ensayos de campo, por la influencia de la variabilidad de la distribución de la humedad de suelo, por el material genético en estudio, bajo número de repeticiones y factores ambientales en que se realizó la evaluación. En trigo, varios investigadores reportan altos valores de coeficientes de variabilidad (Zarei, *et al.*, 2007).

Con relación a los índices de selección para sequía, el índice de Productividad Media Geométrica (PMG) es mucho más preciso que la Productividad Media (PM) en separar genotipos del grupo A, y tiene la habilidad más alta para diferenciar entre rendimientos en agostamiento y en inundación. Por tanto, Productividad Media (PM), que está basado en la media aritmética, es más sesgada cuanto más grande sea la diferencia entre los rendimientos potenciales y los rendimientos en sequía (Darvishzadeh, *et al.*, 2010).

El índice de Productividad Media (PM) es la media de rendimiento de un genotipo en condiciones de inundación y sequedad. Puede identificar genotipos con alto rendimiento en inundación, pero relativamente bajos en sequía (grupo B); en donde falla en distinguir

el grupo A del grupo B (Rosielle and Hamblin, 1981). Productividad Media Geométrica (PMG) es usado por los mejoradores interesados en el comportamiento relativo de los genotipos, desde que la sequía puede variar con severidad en condiciones de campo y a través de los años (Fernández, 1992).

Un alto valor del Índice de Tolerancia al Estrés (ITE) demuestra una alta tolerancia y la mejor ventaja es su habilidad para separar genotipos del grupo de otros grupos. El Índice de Susceptibilidad al Estrés (ISE) identifica genotipos con relativo rendimiento alto en condiciones favorables y bajo rendimiento en condiciones de estrés (grupo B) (Sio-se Mardi *et al.*, 2006). Hosseini, S.J. *et al.*, (2012) indica que alta tolerancia a sequía está relacionada con Productividad Media, Productividad Media Geométrica e Índice de Tolerancia al Estrés.

Los resultados de los análisis de los componentes principales (ACP) y análisis biplot indican que el genotipo IR71706 es un espécimen que tiene respuestas aceptables en condiciones de inundación y sequía, clasificándose en el grupo A. Varios investigadores utilizan el análisis de componentes principales y biplot para tamizar genotipos e identificar los resistentes en condiciones de sequía (Fernández, 1992).

De acuerdo a los resultados y condiciones de este estudio, los índices de Productividad

Media Geométrica, Media Armónica y Productividad Media son los más adecuados para identificar genotipos de arroz tolerantes a sequía.

El índice de Productividad Media (PM) selecciona las líneas IR71706-136-3-2-3 (5), IR78948-B-B-B (6) y PCT6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-2-5-M (1). Productividad Media Armónica selecciona también las mismas líneas. Productividad Media Geométrica, selecciona las líneas IR71706-136-3-2-3 (5), IR78948-B-B-B (6), PCT-6/0/0/0<19-1-4-

3-1-1-2-3-M (3) y PCT6/0/0/0<19-1-4-3-1-1-1-2-5-M (1), siendo el único índice que selecciona la línea 3 como resistentes a sequía, de acuerdo al análisis AMMI-Biplot. Por su parte, el Índice de Rendimiento (IR) selecciona las líneas IR71706-136-3-2-3 (5) y IR78948-B-B-B (6).

Las líneas IR71706-136-3-2-3 (5) y IR78948-B-B-B (6) son líneas de secano desarrolladas por el Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (IRRI) para las condiciones de Asia, las cuales tiene buen comportamiento en condiciones de inundación y sequía.

## 5. Referencias bibliográficas

Abarshahr M, Rabiell B, Samizadehlahigi H. (2011). Assessing genetic diversity of rice varieties under drought stress conditions. *Nat Sci Biol*, 3 (1):114-123.

Ahmadizadeb M, Valizadeh M, Shahbazi H. and Zafizadeh M (2011). Performance of Durum Wheat Landrace under Contrasting Conditions of Drought Stress. *World Applied Science Journal* 13 (5): 1022-1028, 2011.

Atlin G.N., Vemuprasad R, Benier J, Zhao D, Virk P, and Kumar A. (2008). Rice germoplasm development for drought prone environments: Progress made in breeding and genetics analysis at the International Rice Research Institute.

Bernier J., Atlin G.N., Serraj R., Kumar A. and Spaner D. (2008). Breeding upland rice for drought resistance. *J.Sci. Food Agric.* 88: 927-939.

Bouman B.A.M., Tuong T.P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manage.* 49 (1): 11-30.

Boyer J.S. (2010). Drought decision making. *Journal of Experimental Botany.* 61, N° 13, pp. 3493-3497.

Blum A. (2005). Drought resistance, water efficient and yield potential- Are they compatible, dissonant or mutually exclusive. *Aus. J. Agri. Res* 56: 1159-1168.

Cha-um S., Yooyongwecho S. and Supaibul Watana K., (2010). Water deficits stress in the reproductive stage of four indica rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Pak. J. Bot.*, 42 (5): 3387-3398.

Darvishzadeh R, Pirzad A, Hatami-Mleki H, Poormohammad Kiani S, and Sarrafi A. (2010). Evaluation of the reaction of sunflower inbred lines and their F1 hybrids to drought conditions using various stress tolerance indices. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8 (4):1037-1046.

Farroog M., Wahid A., Lee D.J., Ito O. and Siddique H.K., (2009). Advances in drought resistance of rice. *Plant Science* Vol. 28, Issue 4, pp. 199-217.

Fernández G.C. J., (1992). Effective selection criteria for assessing stress tolerance. pp 257-270. In: Kuo CG (Eds.) *Proceeding of the International Adaptation of vegetables and other Food Crop to Temperature and Water Stress*. AVRDC Publ. Tainan, Taiwan, 13-18 August. Pp. 257-27.

Fisher R.A., Maurer R., (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars: I. Grain yield responses. *Aus J Agric Res* 29, 897-912.

Guam Y.S., Serraj R., Liu J.L., Xu J.L., Ali J., Wang W.S., Venus E., Zhu L.H. and Li Z.K., (2010). Simultaneously improving yield under drought stress and non-stress conditions: a case study of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal Environmental Botany*, Vol. 61, No 15, pp. 4145-4156.

Hosseini S.J., Bedin Z., Sarvestani T. and Pirdashti H. (2012). Response of Some Rice Genotypes to Dought Stress. *International Journal of Agriculture:Research and Review*. Vol 2 (4), 475-482.

Jaleel C.A., Maniranman P, Wahid A., Farooq M., Somasundaran R., and Paneerselvan R., (2009). Drought Sress in Plant. A review on Morphological Characteristics and Pigment Composition. *Int. J. Agric., Biol.*, 11: 100-105.

Kamochita A., Babu R.G., Boopathi N.M. and Fukai S., (2008). Phenotipic and genotypic analysis of drought resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed enviroments. *Field crop research* 2008: 1-23.

Kato Y., Okami M. and Katsura K., (2009). Yield potential and water use efficiency of anaerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crop Resesarch*. Volume 113. 3, pp. 328-334.

Kumar A., Bernier J., Verulkar S., Lafitte H.R. and Atlin G.N. (2008). Breeding for drought tolerance: Direct selection for yield, response to selection and use of drought tolerance donors in upland and lowland adapted population. *Field Crops Research* 107, 221-231.

Laffite H.R., Ismail A.M., Bennett J., (2006). Abiotic Stress Tolerance in Tropical Rice: Progress and Furure Prospect. *Oryza* 43: 171-186.

Laffite H.R., Li Z.K., Vijaya Khumar C.H.M., Gao Y.M., Shi Y., Xu J.L., Fu B.Y., Ali Aj., Domingo J., Maghirang R., Torres R., Mackill D. (2006). Improvements of Rice Drought Tolerance Through Backcross Breeding: Evaluation of Donors and Selection in Drought Nurseries, *Field Crops Res.* 97: 77-86 (2006).

Lao L.J., 2010. Breeding for water saving acid drought resistance rice (WDR) in China. *J. Exp. Bot.* (2010) 61 (13): 3509-3517.

Lansigan F.P., (2004). Coping with climate variability and change in rice production sytem in the Philippines. In *Rice is life: Scientific Perspectives for the 21th century*. Proceeding of the World Rice Research Conference, held in Tokyo and Tsukuba, Japan, 4-7, November, 2004.

Majid K and Gholamin R., Jamaati-e-Somarinl S., ZAbahi-e- Mahomoodabah R. (2010). Investigation and Selection Drought Indexes Stress for Corn Genotypes. *American eurasian J. Agric Environ Sci*, 9(1): 22-26, 2010

Ministerio de Agricultura, (2012). *Estadística Agraria*. Lima, Perú.

Ministerio de Agricultura, (2013). *El Arroz. Principales Aspectos de la Cadena Productiva*. 3 pp. Lima, Perú.

Ouk M., Basmayaque J., Tsubo M., Fukai S., Fisher K. S., Cooper M. and Nesbitt H. (2008). Use of drought response index for identification of drought tolerant genotypes in rainfed lowland. *Field Crop Res.*, 99 (2006) pp. 48-58.

Raman A., Verulkar S. B., Mandal N. P., Variar M., V.D. Shukla V.D., Dwivedi J.L., Singh, B.N., Singh O.N., Swain P., Mall A. K., Robin S., Chandrababu R., Jain A., Ram T., Hittalmani S., Haefele S., Piepho HP. and Kumar A. (2012). Drought yield index to select high yielding rice

lines under different drought stress severities. *Rice* 2012, 5:31.

Reynolds M and Tuberosa R. (2008). Translational research impacting on crop productivity in drought-prone environments. *Current opinion in Plant Biology*. 2006. 11: 171-179.

Rosielle A. A. and Hamblin J., (1981). Theoretical Aspects of Selection for Yield in Stress and Non-Stress Environment. *Theoretical Aspects of Selection for Yield in Stress and no Stress Environmental*. *Crop Sci*, 21:943-946.

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

Toriyama K, Heong KL, Hardy B, editors. (2005). *Rice is life: scientific perspectives for the 21st century*. Proceedings of the World Rice Research Conference held in Tokyo and Tsukuba, Japan, 4-7 November 2004. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, and Tsukuba (Japan): Japan International Research Center for Agricultural Sciences. CD-ROM. 590 p

Wassmann R., Jagadish S.V.K., Heuer S., Ismail A., Redoña E., Serraj R., Singh R.K., Howell G., Pathak H., Sumfleth K. (2009). A Climate Change Affecting Rice Production: The Physiological and Agronomic Basis for Possible Adaptation Strategies. In: Donald L. Sparks, editor. *Advances in Agronomy*, Vol. 101. Burlington: Academic Press, 2001, pp 59-122.

Zarei L., Farshadfar E., Haghparast R., Rajabi R., Mohammade Sarab Badiel M., (2007). Evaluation of some indirect traits and index to identify drought tolerance inbred wheat (*Triticum aestivum* L.). *Asian J Plant Sci* 6, 1204-1210.