

## **Rendimiento y estabilidad fenotípica de diez variedades internacionales de trigo harinero en zonas trigueras de Bolivia, 2015-2016**

### **Performance and phenotypic stability of ten international varieties of wheat flour in Bolivia's wheat areas, 2015 – 2016**

**Félix Marza, Roberto Butrón, Félix Quispe, Gilberto Gutiérrez y Lisset Vaca**

Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF)  
Av. Blanco Galindo km 5 ½, Calle Manuel Anaya, Cochabamba, Bolivia  
(femarza@hotmail.com)

#### **Resumen**

Con el objetivo de determinar la estabilidad fenotípica de once variedades de trigo harinero en las zonas trigueras de Bolivia, se establecieron ensayos en siete localidades ubicados en cuatro departamentos. Los ambientes fueron identificados por su representatividad así como por su alta capacidad de discriminación genotipo×ambiente. Los ensayos fueron establecidos en las gestiones 2015-2016, bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar con tres repeticiones. El análisis estadístico paramétrico, aditivo y multiplicativo, permitió la identificación de cultivares que resultaron ser significativamente superiores a la variedad Testigo. El análisis de estabilidad de Eberhart y Russell, el modelo AMMI y el modelo GGE biplot son una herramienta que permite identificar variedades de alto rendimiento y de alta estabilidad. En la presente investigación, la variedad Reedling #1 resulto ser la más estable en los siete ambientes, adicionalmente se detectaron cultivares que exhibieron adaptabilidad específica.

**Palabras claves:** trigo, estabilidad fenotípica

#### **Abstract**

In order to determine the phenotypic stability of eleven varieties of bread wheat in the wheat areas of Bolivia, trials were established in seven locations and in four departments. The environments were identified based on its representativeness as well as by their high capacity for genotype x environment interaction discrimination. The trials were established in the 2015-2016 cropping season, under a completely randomized block design with three replications. The parametric, additive and multiplicative statistical analysis, allowed the identification of cultivars that turned out to be significantly superior to the check. The stability analysis of Eberhart and Russell, the AMMI model and the GGE biplot model are powerful tools that allowed the identification of high performance and high stability varieties. In the present research, the Reedling # 1 cultivar was the most stable in the seven environments, additionally, cultivars that exhibited specific adaptability were detected.

**Keywords:** wheat, phenotypic stability

## Introducción

El trigo (*Triticum aestivum*, L.) constituye la base de la alimentación por contribuir con el 20% de las calorías y proteínas que consume la población mundial, además de que 80 millones de agricultores en el mundo en desarrollo dependen de la producción de trigo para obtener su sustento y generación de ingresos (Lantican *et al.*, 2016). Su importancia también radica en su aporte en la alimentación debido a su valor nutritivo y al alto contenido en carbohidratos que oscila entre 65 al 70%. El trigo básicamente es un cultivo de clima templado; pero debido a su diversidad genética, éste ha extendido sus fronteras y ha llegado a adaptarse casi a todos los climas y alturas del mundo. En Bolivia, el trigo se constituye en la base alimenticia de la población, el consumo per cápita es de 69 kg.año<sup>-1</sup>, la demanda anual alrededor de 700000 t, el análisis histórico de los últimos 10 años indica que la producción se encuentra entre 145000 a 255000 t año<sup>-1</sup>, representando del 21 al 36% de satisfacción de la demanda interna. El rendimiento nacional fluctúa entre 0.9 a 1.4 t ha<sup>-1</sup>, con mejor rendimiento en el oriente 0.9 a 1.9 t ha<sup>-1</sup> mientras en el área tradicional oscila entre 0.7 a 0.9 t ha<sup>-1</sup> (INE, 2015).

Con el propósito de identificar alternativas viables para llenar vacíos tecnológicos cuya aplicación origine saltos cualitativos y cuantitativos significativos en la competitividad del trigo, el Programa Nacional de Trigo (PN-TRIGO) del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF), viene trabajando en el desarrollo sostenible de variedades de alta estabilidad, alto potencial genético para rendimiento, buena calidad, tolerantes a factores bióticos y abióticos adversos con sus correspondientes recomendaciones de manejo, que permitan según el tipo de productores, optimizar su potencial productivo, coadyuvando de ésta manera a la política nacional de seguridad con soberanía alimentaria.

La estabilidad en el rendimiento de trigo, se cuantifica con la finalidad de proporcionarle certeza al productor y desde el ámbito técnico consiste en determinar la adaptación de líneas específicas avanzadas a un ámbito de ambientes productivos donde el rubro es de importancia. Los ambientes pueden variar en prácticas de manejo, la presión de factores bióticos, así como en condiciones edáficas y climáticas. Las posiciones relativas entre los genotipos evaluados en diferentes ambientes a menudo difieren entre ellas, por lo que se dificulta la identificación del genotipo más deseable (Eberhart y Russell, 1966 y Poysa *et al.*, 1986). Estos desafíos se incrementan conforme el grado de variabilidad es mayor entre los ambientes o dentro de la especie (Allard y Bradshaw, 1964). Los mejoradores disponen de los análisis de estabilidad, que les permiten determinar si los cultivares existentes o las líneas avanzadas se adaptan a condiciones ambientales favorables, desfavorables, o a ambas.

El programa de mejoramiento del INIAF viene trabajando para contribuir con la generación de variedades estables en su producción, particularmente para rendimiento, calidad y tolerancia a factores abióticos y bióticos adversos, atributos que son muy importantes al momento de que los productores adopten los nuevos cultivares. La interacción genotipo por ambiente (G x A) representa una de las principales dificultades encontradas en los procesos de selección; lo que puede ocasionar que los mejores en un ambiente no sean los mejores en otro, dificultando el proceso de recomendación de cultivares para una amplia gama de ambientes; siendo necesario la selección de genotipos para un ecosistema o sistema de producción específico.

La generación de tecnología (variedades, recomendaciones agronómicas y otros) constituye un proceso fundamental cuyo éxito se verifica al momento de la adopción que busca satisfacer las expectativas y evitar la aversión al riesgo del

productor, aspecto sobre el que se debe brindar certeza. En línea con el mencionado desafío, es imperativo contar con información respecto a la estabilidad fenotípica para explicar el efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre el comportamiento de los genotipos en estudio y determinar los mejores dominios de recomendación. En el presente estudio se apela a métodos convencionales como el de Eberhart y Russel, AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) y GGE biplot para la identificación y selección de los cultivares que cumplen con el objetivo de presentar estabilidad en su comportamiento a través de localidades. La evaluación de cultivares en ambientes múltiples se realiza con el propósito de determinar la estabilidad fenotípica y la interacción del genotipo con el medio ambiente. El objetivo del presente trabajo

de investigación fue identificar variedades de alto potencial de rendimiento y alta estabilidad fenotípica a partir de once variedades internacionales de trigo harinero en las zonas trigueras de Bolivia.

### Materiales y Métodos

El material genético utilizado para la investigación estuvo constituido por diez variedades internacionales de trigo harinero introducidas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en la gestión 2014 por el Programa Nacional de Trigo, para efectos de comparar el comportamiento de las variedades introducidas se utilizó una variedad local como testigo. La Tabla 1, detalla las once variedades utilizadas en la investigación entre ellos la variedad testigo (Tepoca T89, Motacú y Br-18.)

**Tabla 1.** Variedades internacionales introducidas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en la gestión 2014.

| Nº | Nombre de las variedades | Historia de selección                                |
|----|--------------------------|--|
| 1  | Testigo                  |  |
| 2  | Sonalika                 | II18427-4R-1M  |
| 3  | Sup152/Baj #1            | CMSS07Y00195S-0B-099Y-099M-099Y-16M-0WGY             |
| 4  | Reedling #1              | CMSS06Y00605T-099TOPM-099Y-099ZTM-099Y-099M-11WGY-0B |
| 5  | PBW343                   | CM85836-4Y-0M-0Y-8M-0Y-0IND                          |
| 6  | Roelfs F2007             | CGSS00B00169T-099TOPY-099M-099Y-099M-9CEL-0B         |
| 7  | Super 152                | CGSS02Y00153S-099M-099Y-099M-46Y-0B                  |
| 8  | Baj #1                   | CGSS01Y00134S-099Y-099M-099M-13Y-0B                  |
| 9  | Quaiu #1                 | CGSS01B00046T-099Y-099M-099M-099Y-099M-29Y-0B-12B-0Y |
| 10 | Attila*2/PBW65//Kachu    | CM85836-50Y-0M-0Y-3M-0Y                              |
| 11 | Shiroodi                 | CMSS93B00686S-12Y-010M-010Y-010M-7Y-1M-0Y-3SJ        |

Con el propósito de realizar una adecuada uso de la variabilidad genética, la investigación se desarrolló en múltiples localidades a nivel nacional, los ensayos fueron establecidos en cuatro departamentos: Santa Cruz (Berlín y Vallegrande), Cochabamba (Montenegro, Playa Ancha y Cruce Incallajta) y Tarija (Chaguaya), durante la campaña agrícola 2015-2016. Las localidades para la realización

de las evaluaciones, son zonas representativas de las zonas trigueras en el país, además de contar con características ambientales bien identificadas para el ejercicio de la presión ambiental sobre el comportamiento de cada cultivar. La Tabla 2 muestra la ubicación de los ensayos establecidos en los diferentes departamentos.

**Tabla 2.** Localidad, municipio, provincia y departamento georeferenciado donde fueron establecidos los ensayos de trigo durante la campaña agrícola 2015-2016.

| Departamento | Provincia       | Municipio   | Localidad        | Georeferencia |               |                    |
|--------------|-----------------|-------------|------------------|---------------|---------------|--------------------|
|              |                 |             |                  | Latitud (LS)  | Longitud (LO) | Altitud (m.s.n.m.) |
| Santa Cruz   | Ñuflo de Chávez | San Julián  | Berlín           | 16°57'06"     | 62°35'16"     | 251                |
|              | Vallegrande     | Vallegrande | Vallegrande      | 18°30'30"     | 64°06'08"     | 2037               |
| Cochabamba   | Quillacollo     | Sipe        | Montenegro       | 17°26'23"     | 66°20'40"     | 2565               |
|              | Capinota        | Capinota    | Playa Ancha      | 17°39'33"     | 66°14'57"     | 2399               |
|              | Carrasco        | Pocona      | Cruce Incallajta | 17°36'35"     | 65°16'50"     | 2835               |
| Tarija       | Aniceto Arce    | Padcaya     | Chaguaya         | 21°22'59"     | 64°49'38"     | 2550               |
| La Paz       | Los Andes       | Laja        | Kallutaca        | 16°31'29"     | 68°18'28"     | 3906               |

Los ensayos fueron establecidos bajo un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con tres repeticiones en los siete ambientes. La unidad experimental estuvo constituida de cinco surcos separados a 25 cm y con una longitud de 4 m. La siembra y conducción de los ensayos se realizó en base a los protocolos establecidos por el Programa Nacional de Trigo del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF). Se registraron las variables: altura de planta (AP), tamaño de grano (TG), color de espiga (CE), tolerancia a la sequía (TS), tolerancia a la pircularia (PI), rendimiento (RDTO), número de espigas por metro cuadrado (NEM), reacción al acame (RA), tolerancia a la roya (RY), densidad de espiga (DES), reacción al desgrane (RD), color de grano (CG), días a la madurez (DM), tolerancia a *helminthosporium* (HL), longitud de espiga (LE), número de granos por espiga (NGE), longitud de la arista (LA), tipo de grano (TGR), posición de la espiga (PE), peso de mil granos (PMG) y peso hectolítrico (PH), área foliar (AF) y número de espiguillas (NEE). La operacionalización y análisis estadístico de variables fenotípicas fue como sigue:

**a) Análisis estadístico descriptivo:** con la finalidad de resumir y describir el comportamiento de la expresión fenotípica de las variables cuantitativas evaluadas, para el estudio se consideró el análisis de tendencia central, dispersión y distribución.

**b) Análisis de varianza:** el primer elemento en el análisis del comportamiento de una serie de genotipos en diferentes ambientes fue la identificación estadística de una interacción genotipo ambiente significativa, para el mismo se llevó a cabo un análisis de la varianza de los ensayos incluidos en el estudio. Este análisis procedió en condición previa de la existencia de homogeneidad de varianzas. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$Y_{ij}$  = observación de la variable de la respuesta

$\mu$  = media general

$\beta_j$  = efecto del  $j$ -ésimo bloque

$\tau_i$  = efecto del  $i$ -ésimo cultivar

$\varepsilon_{ij}$  = efecto aleatorio del error experimental

Para efectos de analizar las varianzas del conjunto de los ensayos de las siete localidades, se estableció un modelo mixto con los componentes siguientes:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j(\alpha_i) + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

$Y_{ijk}$  = observación de la variable de la respuesta

$\mu$  = media general

$\alpha_i$  = efecto del  $i$ -ésimo ambiente

$\beta_j(\alpha_i)$  = efecto del  $j$ -ésimo bloque anidado en el  $i$ -ésimo ambiente

$\gamma_k$  = efecto del  $k$ -ésimo cultivar

$(\alpha\gamma)_{ik}$  = efecto de la interacción del  $i$ -ésimo ambiente por el  $k$ -ésimo cultivar

$\varepsilon_{ij}$  = efecto aleatorio del error experimental

### c) Análisis de estabilidad de Eberhart y Russell:

Para el análisis de estabilidad fenotípica se utilizaron los métodos propuestos por Eberhart y Russell, 1966. En este caso, se incluye al coeficiente de regresión ( $\beta_i$ ), calculado en base al efecto ambiental (índice ambiental), considerado fijo y a la varianza de las desviaciones de regresión por genotipo ( $\delta_{ij}$ ).  $\beta_i$  representa la respuesta de un genotipo al mejorar la condición ambiental, en tanto que el segundo ofrece una medida de variabilidad, interpretada como falta de estabilidad. Un genotipo es considerado estable si su coeficiente de regresión es igual a 1 y las desviaciones de regresión son iguales a cero. El modelo responde a la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu_i + \beta_i I_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = promedio del  $i$ -ésimo genotipo en el  $j$ -ésimo ambiente.

$\mu_i$  = promedio del  $i$ -ésimo genotipo en todos los ambientes.

$\beta_i$  = coeficiente de regresión que mide la respuesta del  $i$ -ésimo genotipo a la variación ambiental.

$I_j$  = índice ambiental.

$\delta_{ij}$  = desvío de la regresión del  $i$ -ésimo genotipo en el  $j$ -ésimo ambiente.

$\varepsilon_{ij}$  = la desviación de la regresión de la variedad y el ambiente. El índice ambiental, en cada ambiente es calculado por el desvío del promedio de todos los genotipos en ese ambiente, en relación con el promedio general:  $I_j = Y_j - Y$ .

**a) Análisis de estabilidad AMMI (efectos aditivos y multiplicativos):** El modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) combina análisis de varianza y análisis de

componentes principales en un único modelo aditivo para los efectos principales de genotipos y ambientes y multiplicativo para los efectos de interacción de genotipo por ambiente. El Biplot se construyó a partir de los datos de rendimiento de varias localidades mediante el modelo lineal / bilineal AMMI. El modelo AMMI está representado por la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + \sum \lambda_n \gamma_{in} + \delta_{jn} + \varepsilon_{ij}$$

Donde

$Y_{ij}$  = representa la media del  $i$ -ésimo cultivar en el  $j$ -ésimo ambiente.

$\mu$  = es la media general.

$G_i$  y  $E_j$  = son los efectos principales atribuidos al genotipo (cultivar) y ambiente.

$\lambda_n$  = es el valor singular del  $n$ -ésimo eje del Componente Principal.

$\delta_{jn}$  = representan las puntuaciones para el  $i$ -ésimo cultivar y el  $j$ -ésimo medio ambiente en el  $n$ -ésimo eje del componente principal.

$\varepsilon_{ij}$  = es el error experimental agrupado.

El análisis combina los resultados en un simple Biplot para cada localidad para proporcionar una detección más conservadora de las interacciones del genotipo  $\times$  ambiente repetido a través de los años. Se adoptó el programa SAS de Burgueño *et al.* (2001) para generar las puntuaciones de los ambientes y genotipos para los dos primeros términos bilineales ( $n = 2$ ). El análisis AMMI facilitó la identificación de grupos de ambientes de igual respuesta, ambientes que permiten mejor discriminación del potencial genético entre genotipos y ambientes correlacionados negativamente. Además, este análisis permitió identificar genotipos con adaptaciones específicas en ambientes determinados.

### b) Análisis de estabilidad GGE Biplot.

El modelo GGE biplot se empleó para el análisis de

estabilidad fenotípica (Yan *et al.*, 2000). El análisis se basó en el gráfico producido del biplot simétrico obtenido del programa desarrollado por Burgueño *et al.* (2001). El modelo básico GGE biplot fue el siguiente:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \zeta_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \zeta_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}$$

Donde

$Y_{ij}$  = es el rendimiento promedio del genotipo  $i$  en el ambiente  $j$ .

$\bar{Y}_j$  = es el rendimiento promedio de todos los genotipos en el ambiente  $j$

$i1$  y  $i2$  = son los valores singulares para CP1 y CP2

$\zeta_{i1}$  y  $\zeta_{i2}$  = son los valores del CP1 y CP2 para el genotipo  $i$ .

$\eta_{j1}$  y  $\eta_{j2}$  = son los valores del CP1 y CP2 para el ambiente  $j$ .

$\varepsilon_{ij}$  = es el residual del modelo asociado con el genotipo  $i$  en el ambiente  $j$ .

Este análisis permitió identificar genotipos que muestren una alta estabilidad y altos rendimientos en todas las localidades estudiadas denominándose “genotipo ideal”, el mismo permitió identificar el grado del comportamiento del material genético respecto a las localidades.

## Resultados y discusión

La Tabla 3 muestra los resultados de estadística descriptiva para las variables cuantitativas. En la misma, se puede observar la respuesta promedio de la población de variedades en las distintas localidades. Respecto al rendimiento, se verifica rangos dispersos que permiten inferir la amplia variación existente, registrando un rendimiento máximo de 4972 kg ha<sup>-1</sup> y al otro extremo un mínimo de 21.8 kg ha<sup>-1</sup>, siendo esta una de las variables exhibiendo mayor variación, pudiendo la misma atribuirse a la naturaleza de las condiciones experimentales de las localidades a lo largo del país. De la misma manera, se observa comportamientos dispersos en el peso de mil granos con un promedio de 37.2 g y peso hectolítrico con un promedio estimado de 70.7 kg hl<sup>-1</sup>. En la misma línea, se aprecia características agromorfológicas transgresivas que permiten avizorar respuestas optimistas en los procesos de selección. La mayoría de los valores de coeficiente de sesgo y curtosis no excedieron el rango de  $\pm 1$ , indicando que las distribuciones de las expresiones fenotípicas de las líneas estuvieron dentro de los parámetros de normalidad, excepto para peso hectolítrico.

**Tabla 3.** Estadística descriptiva para variables cuantitativas (PMG: peso de mil granos, PH: peso hectolítrico, RDTO: rendimiento, AP: altura de planta, NEM: número de espigas por metro, LE: longitud de espiga, NGE: número de granos por espiga, NEE: número de espiguillas por espiga, LA: longitud de arista, DF: días a floración) de once cultivares de trigo harinero durante la campaña agrícola 2015-2016.

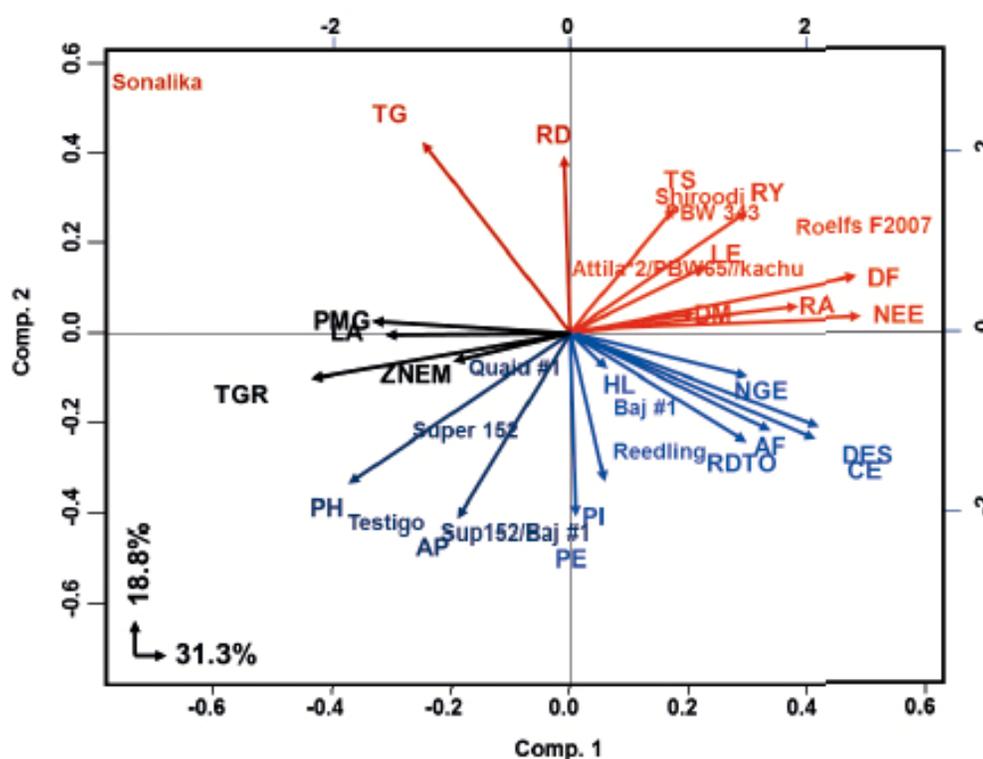
| Variabes          | Mínimo | Máximo  | Media  | Desv. estándar | Asimetría | Curtosis |
|-------------------|--------|---------|--------|----------------|-----------|----------|
| PMG <sup>€</sup>  | 10.00  | 57.00   | 37.2   | 8.95           | -0.43     | -0.15    |
| PH <sup>£</sup>   | 42.00  | 83.20   | 70.7   | 7.47           | -1.00     | 1.67     |
| RDTO <sup>¥</sup> | 21.88  | 4972.00 | 2539.4 | 1328.37        | 0.16      | -1.10    |
| AP <sup>£</sup>   | 47.00  | 105.00  | 71.7   | 12.09          | 0.15      | -0.32    |
| NEM <sup>²</sup>  | 78.00  | 880.00  | 383.0  | 185.15         | 0.38      | -0.70    |
| LE <sup>£</sup>   | 5.00   | 12.00   | 8.2    | 1.27           | 0.50      | -0.05    |
| NGE               | 13.50  | 75.00   | 40.0   | 11.74          | -0.35     | -0.15    |
| NEE               | 10.00  | 20.00   | 15.0   | 1.92           | 0.21      | 0.24     |
| LA <sup>£</sup>   | 3.00   | 10.50   | 6.3    | 1.15           | -0.11     | 0.69     |
| DF <sup>ª</sup>   | 42.00  | 86.00   | 66.0   | 10.72          | -0.01     | -0.73    |

<sup>€</sup> mg; <sup>£</sup> kg hl<sup>-1</sup>; <sup>¥</sup> kg ha<sup>-1</sup>; <sup>£</sup> cm; <sup>²</sup> unidades y <sup>ª</sup> días

Con el propósito de transformar variables altamente correlacionadas en componentes principales no

correlacionados, la descomposición de los dos primeros componentes principales alcanzó a explicar el 51.1% de la varianza acumulada. La representación gráfica de componentes principales de la Figura 1, sintetiza el comportamiento de las diferentes variedades con relación a las variables cuantificadas y calificadas en el estudio. Como lo recomiendan, la lectura se realizó considerando la magnitud del vector, la dirección de los mismos y el ángulo que forman entre sí. De la representación gráfica se logra inferir la presencia de varios grupos de variables, entre ellas las de

componentes de rendimiento, tolerancia a factores adversos, características de calidad entre otros. La magnitud de los vectores para las variables se encuentra en correspondencia con la proporción de la información de los componentes identificados. De la representación de variables y cultivares se logró identificar el nivel de correlación, por ejemplo, rendimiento, número de granos por espigas, tolerancia a piricularia, densidad de espiga, tolerancia a sequía y área foliar. En esta asociación descrita, se destaca la ubicación de las variedades Reedling #1 y Baj#1.



**Figura 1.** Análisis Biplot correspondiente a las características de las variedades de trigo harinero introducidas del CIMMYT, evaluadas en siete localidades trigueras de Bolivia, durante la campaña agrícola 2015-2016. Las características evaluadas fueron: altura de planta (AP), tamaño de grano (TG), color de espiga (CE), tolerancia a la sequía (TS), tolerancia a la piricularia (PI), rendimiento (RDTO), número de espigas por metro cuadrado (NEM), reacción al acame (RA), tolerancia a la roya (RY), densidad de espiga (DES), reacción al desgrane (RD), color de grano (CG), días a la madurez (DM), tolerancia a helminthosporium (HL), longitud de espiga (LE), número de grano por espiga (NGE), longitud de la arista (LA), tipo de grano (TGR), posición de la espiga (PE), peso de mil granos (PMG) y peso hectolítrico (PH), área foliar (AF) y Número de espiguillas (NEE).

El análisis de varianza para el rendimiento de cada una de las localidades muestra la existencia de diferencias significativas entre bloques ( $P < 0.05$ ) en todas las localidades, del mismo modo las variedades muestran diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en las siete localidades, estas diferencias explican el grado diferencial en el comportamiento

de las variedades en las localidades (Tabla 4). Similar respuesta es identificada para el 90% de las variables consideradas en el estudio (resultados no incluidos en este sector). Resultados con características en la misma tendencia fueron reportados por Marza et al 2016.

**Tabla 4.** Análisis de varianza individual para rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para once cultivares de trigo harinero evaluados en siete localidades durante las campañas agrícolas 2015-2016.

| FV             | GL | Cuadrados medios |             |           |                  |              |           |            |
|----------------|----|------------------|-------------|-----------|------------------|--------------|-----------|------------|
|                |    | Sipe-Sipe        | Playa Ancha | Berlín    | Cruce Incallajta | Valle Grande | Chaguaya  | Kallutaca  |
| Bloque         | 2  | 891933.2*        | 153811.9*   | 18403**   | 344447.3*        | 54987.5*     | 57902.5*  | 419680.1*  |
| Cultivar       | 10 | 622232.3*        | 437465.2*   | 795061.1* | 1352766.0*       | 507540.2*    | 337025.5* | 1239374.1* |
| Error          | 20 | 233752.4         | 199848.7    | 26733.6   | 205650.6         | 60205.0      | 57322.1   | 114502.5   |
| CV (%)         |    | 11.9             | 10.8        | 19.2      | 14.6             | 13.2         | 18.6      | 14.3       |
| R <sup>2</sup> |    | 0.63             | 0.54        | 0.94      | 0.77             | 0.80         | 0.75      | 0.85       |

FV=fuentes de variación; GL=grados de libertad; CV=coeficiente de variación y R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación

\* Significancia estadística al 5% de probabilidad

\*\* Significancia estadística al 1% de probabilidad

ns No significancia estadística

En la Tabla 5, se presenta el análisis de varianza combinado a través de localidades para la variable rendimiento en grano ( $\text{tha}^{-1}$ ), en el mismo, se observa diferencias altamente significativas ( $P < 0.01$ ) entre localidades y localidades por genotipos, sin embargo, el efecto del genotipo no fue significativo por las características de la población (variedades). El efecto localidad resultó altamente significativo en términos de la expresión de productividad del material, siendo ésta el reflejo de las características

distintivas de cada sistema, además de la expresión de los factores de producción. El factor de variación de localidades  $\times$  genotipos (interacción) explica el grado diferencial en el comportamiento de los genotipos en las distintas localidades, verificándose una respuesta a la especificidad en términos de adaptabilidad a las condiciones ambientales y de factores de producción que ameritan un análisis más detallado a través de metodologías diseñadas para el efecto.

**Tabla 5.** Análisis de varianza combinado para rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para once cultivares de trigo harinero evaluados en siete localidades durante las campañas agrícolas 2015-2016.

| FV                   | GL         | Suma de cuadrados  | Cuadrados medios | F-Valor | Pr > F |
|----------------------|------------|--------------------|------------------|---------|--------|
| Localidad            | 6          | 330970335.5        | 55161722.6       | 198.92  | 0.0001 |
| Bloq/Loc             | 14         | 3882330.8          | 277309.3         | 2.15    | 0.0127 |
| Genotipo             | 10         | 10883405.7         | 1088340.6        | 1.55    | 0.1432 |
| Loc $\times$ Gen     | 60         | 42031239.3         | 700520.7         | 5.42    | 0.0001 |
| Error                | 140        | 18080298.3         | 129145.0         |         |        |
| <b>Total</b>         | <b>231</b> | <b>405847609.7</b> |                  |         |        |
| <b>CV (%)</b>        |            | <b>14.2</b>        |                  |         |        |
| <b>R<sup>2</sup></b> |            | <b>0.95</b>        |                  |         |        |

FV=fuentes de variación; GL=grados de libertad; CV=coeficiente de variación y R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación.

Los parámetros de estabilidad estimados de acuerdo al modelo de Eberhart y Russell permitieron identificar las variedades más estables en términos de ambiente (Tabla 6 y Figura 2). Las variedades que presentaron valores de coeficiente de regresión ( $\beta_i$ ) cercano a uno y desviaciones de regresión ( $\delta_{ij}$ ) con valores diferentes a cero fueron los siguientes:

Reedling #1, Baj #1, Attila\*2/PBW65//kachu, Quaiu #1, PBW 343 y Sonalika, estos cultivares exhibieron alta estabilidad fenotípica, de estas, el cultivar Reedling #1 resulto ser el de mayor potencial productivo a través de las diferentes localidades comprendidas en el estudio.

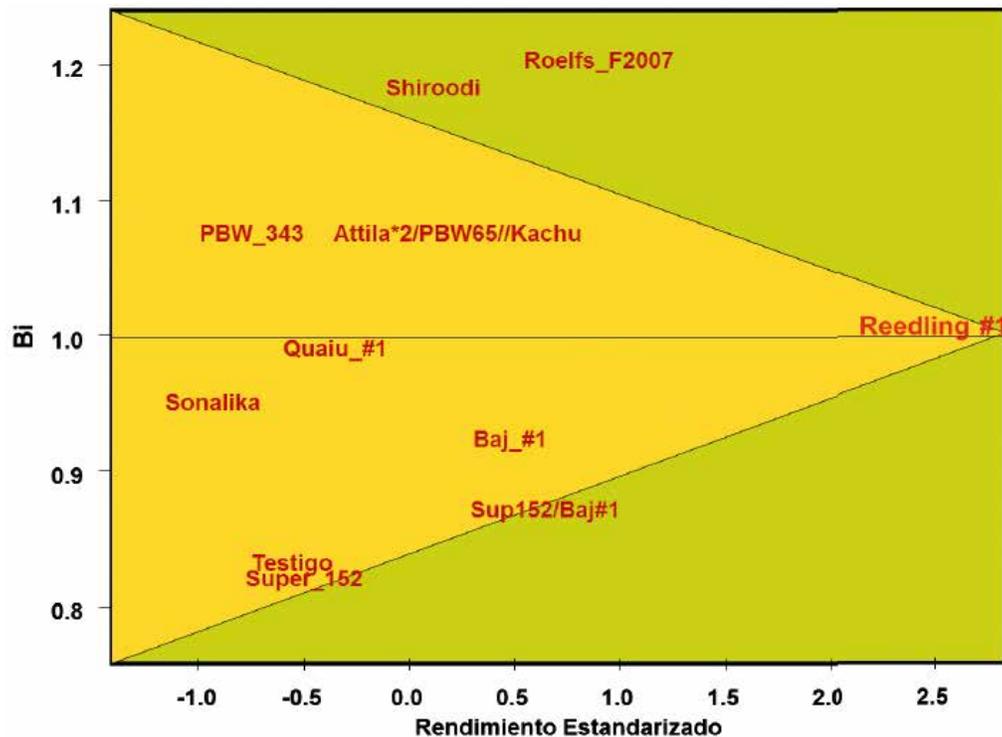
**Tabla 6.** Rendimiento promedio ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y parámetros de estabilidad de once cultivares de trigo harinero evaluados en once localidades durante la campaña agrícola 2015-2016.

| Nº | Cultivar              | Promedio | Coefficiente de Regresión ( $\beta_i$ ) | Desviación de la Regresión ( $\delta_{ij}$ ) | OM |
|----|-----------------------|----------|---|--|----|
| 1  | Reedling #1           | 3101.5   | 1.01                                    | -1894.1                                      | 1  |
| 2  | Roelfs F2007          | 2694.9   | 1.21                                    | 639544.2                                     | 2  |
| 3  | Sup152/Baj #1         | 2636.7   | 0.88                                    | 223528.2                                     | 3  |
| 4  | Baj #1                | 2626.4   | 0.93                                    | 42725.2                                      | 4  |
| 5  | Shiroodi              | 2534.2   | 1.19                                    | 139892.2                                     | 5  |
| 6  | Attila*2/PBW65//kachu | 2508.3   | 1.08                                    | 200130.6                                     | 6  |
| 7  | Quaiu #1              | 2425.9   | 0.99                                    | 17524.9                                      | 7  |
| 8  | Super 152             | 2387.7   | 0.83                                    | 168291.3                                     | 8  |
| 9  | Testigo               | 2385.9   | 0.83                                    | 122436.7                                     | 9  |
| 10 | PBW 343               | 2335.7   | 1.08                                    | 152286.8                                     | 10 |
| 11 | Sonalika              | 2296.2   | 0.96                                    | 242481.7                                     | 11 |

En la Tabla 6 se observa el ranking de rendimiento promedio alcanzado por las once variedades de trigo harinero promediado sobre siete localidades para la campaña agrícola 2015-2016. Se identificaron a los cultivares Reedling #1, Roelfs F2007, Sup152/Baj#1 y Baj#1 con  $3101.5 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $2694.9 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $2636.7 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $2626.4 \text{ kg ha}^{-1}$  respectivamente, resultando ser los de mayor potencial productivo, superando ampliamente al testigo local, característica que refleja la aptitud genética superior bajo las condiciones de producción de las zonas trigueras representativas del país. Marza *et al.* (2015) compararon los rendimientos de líneas élites de trigo harinero recomendada para las zonas semiáridas (SAWYT)

en doce localidades y reportaron rendimientos promedios de  $1977.4 \text{ kg ha}^{-1}$ , inferiores en un 20% a los obtenidos en el presente estudio, atribuyéndose el mismo a la ampliación de la variabilidad genética en el transcurso del avance del programa trigo del INIAF, así como el desempeño favorable de los factores físicos de producción.

Las variedades Roelfs F2007, Sup152/Baj #1, Shiroodi, Super 152 y Testigo presentaron los valores de coeficiente de regresión ( $\beta_i$ ) diferente a uno y desviaciones de regresión ( $\delta_{ij}$ ) con valores diferentes a cero, estas cultivares fueron calificadas como muy inestables con respuestas inestables a través de los ambientes incluidos en el estudio.



**Figura 2.** Coeficientes de regresión versus promedio de rendimiento estandarizado para once variedades de trigo harinero evaluadas en siete localidades durante la campaña agrícola 2015-2016.

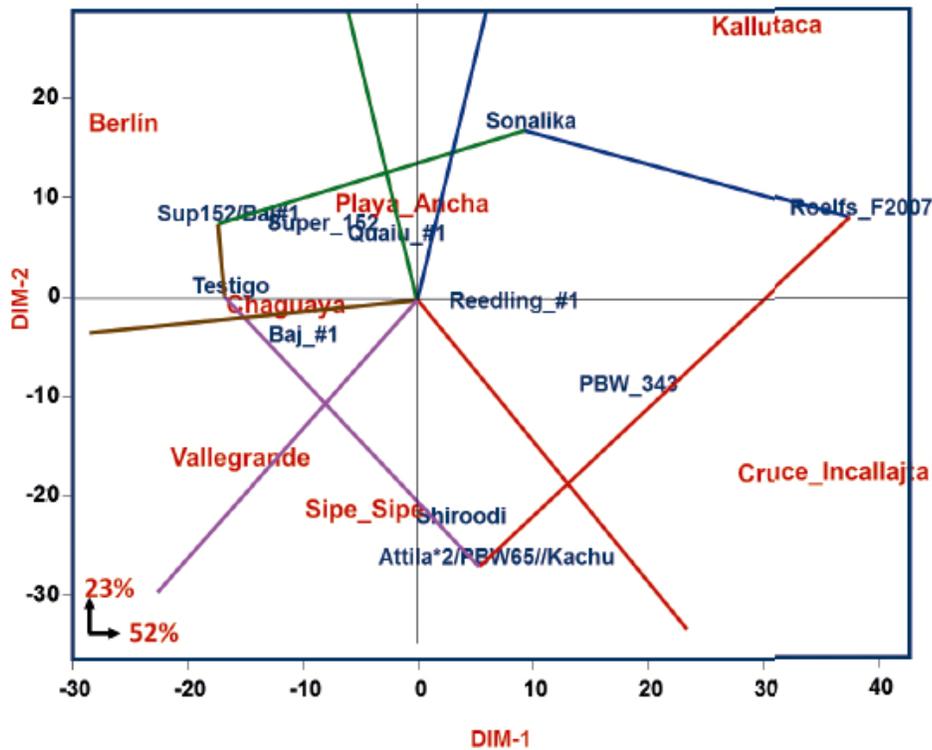
Las desviaciones de regresión ( $\delta_{ij}$ ) mostraron, para todos los casos, ser diferentes de cero, lo que indica que el modelo lineal no es el apropiado para describir la respuesta de los genotipos en función del efecto ambiental, ya que, según este criterio, los genotipos no son estables debido a variaciones impredecibles.

El análisis AMMI (Figura 4) permitió detectar diferencias estadísticamente significativas entre ambientes, genotipos y la interacción genotipo  $\times$  ambiente para la mayoría de variables consideradas. Efectos altamente significativos para la interacción justifican análisis posterior para determinar el efecto en el comportamiento de los diferentes cultivares a través de los ambientes.

La transformación de las correlaciones con respecto a rendimiento entre cultivares, así como localidades, es explicada en proporción a la variación total explicada, siendo que con esta metodología se

explicó el 75% de la variabilidad en el estudio a través de los dos componentes identificados.

El polígono trazado con los cultivares más alejados del origen del biplot (Sup152/Baj#1, Sonalika, Roelfs F2007, Attila\*2/PBW65//Kachu) se denominan cultivares vértice, estas exhibieron mayor interacción genotipo  $\times$  ambiente, por tener los vectores de mayor magnitud en sus respectivas direcciones, además mostró adaptaciones específicas muy sensibles ante cambios ambientales. El trazo perpendicular en cada lado del polígono y que atraviesa el origen, permitió identificar cinco sectores, con el cultivar extremo ubicado en el vértice del mismo. Para Yan y Kang (2003), un cultivar que se encuentra en el origen, se clasificaría con un comportamiento similar en todos los ambientes; por lo tanto, no respondería al cambio ambiental, en este caso Reedling #1 está cerca del origen en sentido positivo y representa el cultivar que tiene mayor estabilidad para la variable rendimiento.



**Figura 3.** Componente Principal (CP), análisis aditivo de efectos principales y de interacción multiplicativa (AMMI) resumiendo el comportamiento de once cultivares de trigo harinero evaluado en siete localidades durante la campaña agrícola 2015-2016.

El modelo GGE biplot explicó 59.4% de los efectos combinados de genotipos y de la interacción genotipo ambiente, el CP1 36.5 % y el CP2 22.87 % de la variabilidad total (Figura 4). Estos resultados permiten una interpretación confiable del comportamiento de la interacción genotipo  $\times$  ambiente, ya que un valor aceptable es una proporción mayor a 60 % (Crossa, 1990; Rodríguez *et al.*, 2005).

La gráfica GGE biplot permitió visualizar el comportamiento de los cultivares en un ambiente dado (Figura 4). La línea que pasa a través del origen del biplot y el valor del genotipo Reedling #1 es el más alejado del origen y está proyectada en las localidades de Sipe Sipe y Vallegrande. La línea que atraviesa el origen del biplot y es perpendicular al eje de Reedling#1 separa los cultivares con un rendimiento mayor a la media.

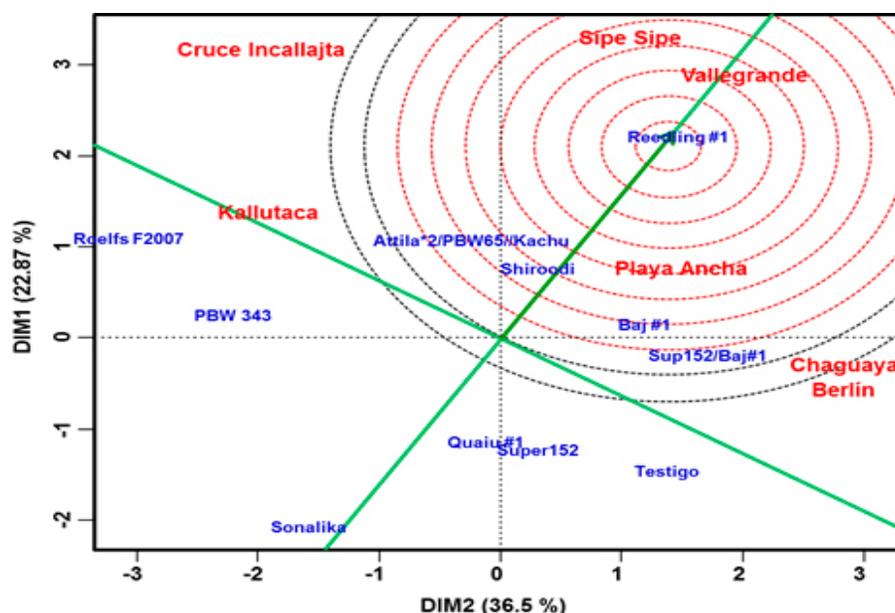
La distancia desde el origen del biplot a la marca de un ambiente se llama vector ambiental y la longitud del vector es una medida de la habilidad de los ambientes para discriminar el comportamiento de los cultivares. Un vector corto respecto al tamaño del biplot implica que todos los cultivares tienen un rendimiento similar en el ambiente asociado. Así, las diferencias entre cultivares basadas en proyecciones con vectores ambientales cortos no son confiables (Yan y Hunt, 2002).

El GGE biplot permite identificar el genotipo ideal que tiene las características de tener al mismo tiempo el mayor rendimiento medio y alta estabilidad en todos los ambientes. Por tanto, el genotipo ideal es un punto denominado absolutamente estable en la dirección positiva y la longitud de su vector asociado debe ser igual al de mayor vector genotipo del lado positivo. Los círculos concéntricos con

centro del genotipo ideal permiten visualizar la distancia entre todos los genotipos y el genotipo ideal (Yan, 2001).

En la Figura 4, se destaca a Reedling #1 y se constituye en el genotipo ideal que obtuvo el mayor rendimiento y también destaca por su alta estabilidad en los siete ambientes seguida de Attila\*2/PBW65//Kachu y Shiroodi.

Yan y Kang (2003) señalan que la estabilidad es importante, aunque es sólo un modificador del rendimiento medio. Una medida de la estabilidad determinada por la interacción genotipo  $\times$  ambiente, es útil sólo cuando se considera conjuntamente con el rendimiento de los cultivares. Por ejemplo, Shirodi es uno de los más estables conjuntamente con Reedling #1; esto no significa que sean los cultivares más deseables, pues el resultado sólo indica que obtuvieron rendimientos medios en la mayoría de los ambientes (Yan y Kang 2003).



**Figura 4.** Análisis GGE Biplot del genotipo ideal con respecto a rendimiento y estabilidad de once cultivares de trigo harinero evaluado en siete localidades durante la campaña agrícola 2015-2016.

### Conclusiones

Se identificó al cultivar Reedling #1 como el de mayor potencial productivo en un amplio rango de localidades representativas para la producción de trigo en Bolivia. Los cultivares Roelfs F2007 y Super152/Baj#1 fueron identificados como muy promisorios; sin embargo de menor potencial productivo respecto a Reedling #1.

La distribución de los cultivares en los análisis de estabilidad de Eberhart y Russell, el modelo AMMI

y el modelo GGE biplot permitieron identificar al cultivar Reedling #1 cerca a los parámetros ideales de estabilidad y también cerca del origen, con tendencia de dirección vectorial positiva, indicando que el mismo mostro mínima interacción con los ambientes, verificándose su adaptabilidad a un rango amplio de ambientes, constituyéndose en la más estable; mientras que los cultivares Roelfs F2007 y Super152/Baj#1 se mostraron algo alejados del punto de origen mostrándose como materiales con adaptabilidad específica.

## Referencias

- Abderrahmane, H., Z. Abidine, F. Hamenna, B. Ammar. 2013. Correlation, path analysis and stepwise regression in durum wheat (*Triticum durum* desf.) under rainfed conditions. Journal of Agriculture and Sustainability. 3(2): 122-131
- Allard R.W., and Bradshaw A.D. 1964. Implications of genotype-environment interactions in applied plant breeding. Crop Sci. 4: 03-507
- Burgueño J., J. Crossa, and M. Vargas. 2001. SAS Programs for graphing GE and GGE biplot. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit CIMMYT, México. pp: 29-36.
- Crossa J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. Adv. Agron. 44: 55-85
- Crossa, J. 2012. From genotype  $\times$  environment interaction to gene  $\times$  environment interaction. Current Genomics 13: 225-244
- Eberhart S.A., Russell W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. Crop Science 6:36-40
- Gauch, H.G., H.-P. Piepho, and P. Annicchiarico. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. Crop Sci. 48: 866-889
- Hussein, M.A, Bjornstad, A., and A.H. Aastveit. 2000. SASG X ESTAB: A SAS program for computing genotype x environment stability statistics. Agron. J. 92: 454-459. Agron. J. 92:454-459
- INE. 2015. Reporte anual de estadísticas agrícolas de Bolivia. La Paz, Bolivia, 24 p
- Kang, M.S., M.G. Balzarini, and J.L.L. Guerra. 2004. Genotype-by-environment interaction. In (A.M. Saxton ed.) Genetic Analysis of Complex Traits Using SAS. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Lantican, M; Braun, H.; Payne, T; Singh, R.; Sconder, K.; Braun, M.; Ginkel, M. and Erenstein, O. 2016. Impacts of International Wheat Improvement Research 1994-2014. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, México, DF. 59 p.
- Marza, F.; Butrón R.; Quispe, F.; Gutierrez, G.; Huallpa, B.; Vaca, L. y Jerez, E. 2016. Estabilidad en genotipos de trigo harinero en condiciones semiáridas. En Trigo Generando Tecnología de Producción. Revista INFO-INIAF. Pp: 1-16
- Peipho, H.P., and J. Mohring. 2005. Best Linear unbiased prediction of cultivar effects for subdivided target regions. Crop Sci. 45: 1151-1159
- Poysa V.W., Garton R., Courtney W.H., Metcalf J.G., Muehmer J. 1986. Genotype-environment interactions in processing tomatoes in Ontario. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111(2): 293-297
- Rodríguez P., J. E., J. Sahagún, H. E. Villaseñor, J. D. Molina, y A. Martínez. 2005. La interacción genotipo  $\times$  ambiente en la caracterización de áreas temporales de producción de trigo. Agrociencia 39: 51-64
- Smith, A.B., B.R. Cullis, and R. Thompson. 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. Journal of Agricultural Science 143: 449-462
- Yan, W. 2001. GGE-biplot- a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. Agron. J. 93(5): 1111-1118
- Yan, W., and J.B. Holland. 2010. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. Euphytica 171: 355-369
- Yan, W., and L. A. Hunt 2002. Biplot Analysis of Multi environment Trial Data. In: Kang, M. S. (ed). Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding. CABI Publishing, CAB International, Wallingford. Oxon Ox10 8DE UK. 400 p.
- Yan, W., and M. Kang. 2003. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL. 271 p.
- Yang, R.-C., J. Crossa, P.L. Cornelius, and J. Burgueño. 2009. Biplot analysis of genotype x environment interaction: proceed with caution. Crop Sci. 49: 1564-1576