

## Interacción genotipo-ambiente del rendimiento en híbridos de maíz amarillo mediante AMMI y SREG

María Corina Ponce-Encinas<sup>1</sup>  
Fernando López-Morales<sup>2§</sup>  
Julián Chura-Chuquija<sup>1</sup>  
Enrique Hernández-Leal<sup>3</sup>  
Gregorio Hernández-Salinas<sup>4</sup>  
Agustín Aragón-García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Investigación y Proyección Social de Maíz-Universidad Nacional Agraria La Molina. Avenida La Molina s/n, Lima 12, La Molina, Lima, Perú. CP. 15026. (mcponce@lamolina.edu.pe; chura@lamolina.edu.pe). <sup>2</sup>Manejo Sostenible de Agroecosistemas-Instituto de Ciencias-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-*EcoCampus* Valsequillo. Edificio VAL1, carretera a San Baltazar Tétela km 1.7, San Pedro Zacachimalpa, Puebla. CP. 72960. (agustin.aragon@correo.buap.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental La Laguna-INIFAP. Boulevard José Santos Valdez 1200 Pte. Matamoros, Coahuila. CP. 27440. (hernandez.enrique@inifap.gob.mx). <sup>4</sup>Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico Superior de Zongolica-Extensión Tezonapa. Zongolica Carretera a la Compañía s/n km 4, Tepetitlanapa, Zongolica, Veracruz, México. CP. 95005. (gregorio.hs@zongolica.tecnm.mx).

§Autor para correspondencia: (fernando.lopez@colpos.mx).

### Resumen

Es indispensable para los programas de fitomejoramiento de maíz (*Zea mays* L.) seleccionar materiales homogéneos, con alto rendimiento y atributos agronómicos estables; asimismo, con buena adaptabilidad en ambientes contrastantes. El objetivo del trabajo fue evaluar la estabilidad e interacción genotipo-ambiente del rendimiento de 36 híbridos de maíz amarillo duro, evaluados en siete ambientes de Perú, durante 2016-2018, dichos materiales fueron analizados mediante los modelos AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) y SREG (regresión de sitios). El diseño utilizado en cada experimento fue un látice 6×6 con tres repeticiones y la variable respuesta fue el rendimiento de grano. Se realizó un análisis de varianza combinado, en el cual se detectó diferencias estadísticas entre ellos ( $p \leq 0.05$ ), posteriormente se aplicó la prueba de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ) finalmente, se ejecutaron los modelos AMMI y SREG y se obtuvieron las gráficas biplot de cada modelo estadístico. De la interacción entre el CP1 y CP2, el AMMI explicó el 45.5 y 15.3%, respectivamente y SREG con 59.8 y 12.2%, para los mismos componentes. Los híbridos trilineales Dk-5005 y AG-01 superaron a los híbridos de cruce doble. El modelo AMMI detectó la interacción GE existente en el rendimiento de grano, y el SREG agrupó con precisión los sitios de evaluación en seis mega-ambientes. Los tres ambientes de La Molina y de Huánuco identificaron a Dk-5005 y AG-01 con mayor rendimiento de grano (11.524 y 11.359 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente).

**Palabras clave:** *Zea mays*, estabilidad y adaptabilidad, gráfica biplot, híbridos dobles y trilineales.

Recibido: marzo de 2022

Aceptado: julio de 2022

## Introducción

En Perú la superficie cosechada de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en 2018 fue de 246 594 ha, de las cuales 80% se produjo en seco y 20% restante (1 265 072 t) con riego, con rendimiento promedio de 5 100 t ha<sup>-1</sup> (MINAGRI, 2020). El rendimiento de grano es la característica más importante para considerar cuando se realizan evaluaciones con maíz en diferentes localidades, ya que los efectos ambientales (E) cuentan con el mayor porcentaje de la suma de cuadrados sobre los genotipos (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE) (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015; López-Morales *et al.*, 2019). La interacción GE es el comportamiento relativo diferencial que muestran los genotipos al evaluarse en diferentes ambientes (Vallejo y Estrada, 2002).

Por lo anterior, cuando los fitomejoradores buscan genotipos con rendimientos mayores para diferentes localidades o condiciones ambientales enfrentan desafíos como la estabilidad y adaptabilidad (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015). La estabilidad es la capacidad del genotipo de comportarse consistentemente con altos o bajos niveles de rendimiento a través de ambientes y la adaptabilidad es la capacidad del genotipo en manifestar un desempeño óptimo en diversas condiciones ambientales (Vargas *et al.* (2016). Eberhart y Russell (1966) señalaron que la estabilidad es una característica genética y que los genotipos con amplia adaptabilidad poseen una baja interacción GE; por ello, es importante determinar la estabilidad y la adaptabilidad para la selección y recomendación de genotipos de *Z. mays* en ambientes específicos (Gómez *et al.*, 2018).

Aunado a lo anterior, las condiciones ambientales cambian ‘año tras año’, aún en las mismas localidades; por tanto, es recomendable evaluar diversos genotipos (variedades experimentales y comerciales). Tales evaluaciones se deben realizar en diferentes localidades y durante varios años, lo que permitirá seleccionar los materiales con mayor estabilidad y adaptabilidad (Camargo-Buitrago *et al.*, 2011). Los modelos más empleados en las últimas dos décadas para el estudio de la estabilidad y la adaptabilidad genotípica a través de ambientes son el de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y los sitios de regresión (SREG) (Farias *et al.*, 2016).

El AMMI une el análisis de varianza con el análisis de componentes principales, con el supuesto de que los productos principales (G y E) son de naturaleza aditiva y la interacción GE es de naturaleza multiplicativa (Neisse *et al.*, 2018), mientras que el SREG elimina el efecto ambiental individual (G + GE) para examinar solo el efecto de los G y la interacción GE. La capacidad de discriminar, visualizar las similitudes y diferencias entre los E de prueba y los G es elemental porque permite definir mega-ambientes, así como la magnitud de la interacción dentro de cualquier genotipo o localidad (Ledesma-Ramírez *et al.*, 2012).

Autores como Dia *et al.* (2016); Yan (2016), han documentado que ambos modelos (AMMI y SREG) se complementan, permitiendo una mejor interpretación mediante los gráficos biplot (Neisse *et al.*, 2018; Fayeun *et al.*, 2018). El análisis gráfico de AMMI permite obtener conclusiones sobre la estabilidad, el comportamiento del genotipo, la diferencia genética entre genotipos y los ambientes con un rendimiento adecuado, el SREG complementa la estratificación ambiental de AMMI, generando mega-ambientes e identificando genotipos con un rendimiento sobresaliente en cada grupo. En ambos modelos la variable relevante es el rendimiento, ya que es la más afectada por la interacción GE (Castillo *et al.*, 2012; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015) debido a que es una característica cuantitativa poligénica.

Por todo lo anterior, es indispensable la generación de conocimiento que nos ayude a descartar híbridos experimentales que no cumplan con ciertas características como son rendimiento, homogeneidad (altura de planta y de mazorca, días a floración masculina y femenina) y con ciertos atributos agronómicos (como número de hileras, longitud y diámetro de mazorca) y seleccionar aquellos materiales más rendidores con estabilidad y adaptabilidad en ambientes contrastantes. Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar la estabilidad y adaptabilidad del rendimiento de grano en 36 híbridos de maíz amarillo duro adaptados al área costera y de sierra del Perú, mediante los modelos AMMI y SREG, bajo la hipótesis de que el SREG permite identificar aquellos materiales con mayor estabilidad y adaptabilidad en términos de rendimiento de grano.

## Materiales y métodos

### Material genético

De los 36 híbridos de maíz amarillo duro evaluados, 29 fueron de cruza doble de grano amarillo, textura cristalina y mazorca cilíndrica, los cuales tienen su origen de las líneas del CIMMYT; asimismo, cuatro genotipos: PM-212 (híbrido de cruza doble) y los híbridos experimentales PM-9, PM-12 y PM-13. Todas las cruza de los 33 materiales antes mencionados fueron generadas por el Programa de Investigación y Proyección Social en Maíz (PIPS), de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), con coordenadas geográficas 12° 04' 55'' S y 76° 56' 53'' O, la cual se ubica a 241 msnm, donde prevalece el clima semicálido húmedo (SENAMHI, 2020). Los tres testigos comerciales evaluados fueron: DK-5005 (trilineal, de origen estadounidense, adaptado a las condiciones de Perú), AG-01 (trilineal, de origen brasileño, con una amplia adaptación) y XB-8010 (híbrido de cruza doble, de origen brasileño, altamente productivo).

### Ubicación de los experimentos, diseño y unidad experimental

En 2016 se establecieron experimentos con todos los híbridos en las localidades de La Molina (LM-2016) y Cañete (CA-2016) en la zona costera y en Huánuco (HU-2016) y Pillco Marca (PM-2016), pertenecientes a la región sierra baja. Para el ciclo agrícola 2017, la evaluación se hizo en las localidades de La Molina (LM-2017) y Huánuco (HU-2017) y para 2018 los híbridos se evaluaron sólo en La Molina (LM-2018). La zona costera presenta un clima semicálido húmedo y la región sierra baja, templado húmedo (SENAMHI, 2020). Las características edafoclimáticas y el manejo agronómico se presentan en el (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Manejo agronómico y condiciones de los siete ambientes de evaluación (2016-2018).**

Ambientes	Provincia	Altitud (m)	Fecha siembra/cosecha	Tipo de suelo	Precipitación (mm) <sup>†</sup>	T (°C)	
						Máx	Mín
La Molina (LM-2016)	Lima	241	16-04/15-11-16	Leptisol	10.8 <sup>a</sup>	27.5	15.5
La Molina (LM-2017)	Lima	241	16-04/15-11-17	Leptisol	10.6 <sup>a</sup>	26.7	14.3
La Molina (LM-2018)	Lima	241	16-04/18-11-18	Leptisol	10.4 <sup>a</sup>	27.1	15.4
Huánuco (HU-2016)	Huánuco	1 894	03-10/15-03-17	Inceptisol	388.5 <sup>b</sup>	26.5	8.2
Huánuco (HU-2017)	Huánuco	1 894	07-10/16-03-18	Inceptisol	384.9 <sup>b</sup>	26	8.5
Pillco Marca (PM-2016)	Huánuco	1 930	09-10/20-03-17	Inceptisol	374.1 <sup>b</sup>	26.7	7.9
Cañete (CA-2016)	Cañete	38	15-06/21-01-17	Fluvisol	11.4 <sup>a</sup>	24.5	16.4

<sup>†</sup> = media anual; <sup>a</sup> = siembra con riego inicial y cinco riegos auxiliares; <sup>b</sup> = siembra de temporal con riego inicial; Máx = temperatura máxima; Mín = temperatura mínima (durante el periodo siembra/cosecha).

El diseño empleado en todas las localidades y años fue látice 6×6 con tres repeticiones, la unidad experimental constó de dos surcos de 6 m de longitud y 0.8 m de ancho. Se sembraron tres semillas por mata a una distancia de 40 cm y se realizó un aclareo un mes después de la siembra dejando 64 plantas por parcela experimental, para una densidad de población de 62 500 plantas ha<sup>-1</sup>.

### Fertilización y manejo de los ensayos

En la localidad de La Molina (LM-2016, LM-2017 y LM2018) y Cañete (CA-2016) se utilizó la fórmula de fertilización 190-160-160 y 210-80-00 (N-P-K, kg ha<sup>-1</sup>), respetivamente, aplicando al momento de la siembra todo el fósforo y 50% de nitrógeno y potasio (este último elemento sólo para La Molina) a los 15 días después de la siembra (DDS) y el resto al finalizar la labor de cultivo.

En las dos localidades se aplicó un riego preliminar y cinco riegos auxiliares durante el ciclo de cultivo. Para Huánuco (HU-2016 y HU-2017) y Pillco Marca (PM-2016) se empleó la fórmula 220-115-82-21S-18Mg, colocando 110 unidades de nitrógeno y 100% de los demás elementos a los 15 DDS y la diferencia de nitrógeno a los 40 DDS, estas localidades fueron de temporal, con un riego al inicio de la siembra. En la segunda labor cultural, para el control de malezas en las siete localidades se aplicaron por separado los herbicidas con ingrediente activo glifosato y atrazina, siendo las dosis de 1.5 y 1 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente y para el gusano cogollero [*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)] se utilizó el insecticida clorpirifos con una dosis de 5 kg ha<sup>-1</sup>, los cuales se diluyeron de manera independiente en 200 L de agua.

### Variable respuesta

El rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) se calculó con la fórmula descrita por Manrique (1997):  $R = \frac{10\,000}{A} \times 0.971 \times PD \times r$ . Donde: A= área de la parcela; PD= porcentaje de desgrane (peso de grano entre peso de mazorca por 100); r= rendimiento de la unidad experimental en kg a 14% de humedad. El valor 0.971 es el coeficiente de contorno que es la constante de la unidad experimental.

### Análisis estadístico

Con los datos de rendimiento de grano de los 36 híbridos en los siete ambientes se realizó un análisis de varianza y la prueba de Gollob, utilizando el procedimiento GLM de SAS<sup>®</sup> versión 9.0 (SAS Institute, 2012), cuando se detectaron diferencias significativas entre híbridos ( $p \leq 0.05$ ) se aplicó la prueba de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), además, se aplicaron los modelos AMMI y SREG para determinar los efectos de la interacción GE, la estabilidad y la adaptación (Castillo *et al.*, 2012; Neisse *et al.*, 2018), con el mismo paquete estadístico. Finalmente, se elaboró una gráfica biplot para cada modelo estadístico para mostrar la interacción GE, ambos biplot se generaron con los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2).

## Resultados y discusión

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.001$ ) en todas las fuentes de variación para rendimiento de grano: ambientes (E), repetición×E, genotipos (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE), los cuales explicaron 70.2, 0.5, 13.3, 16%, respectivamente, de la suma de cuadrados total (Cuadro 2). La desigualdad entre los genotipos de maíz y ambientes

manifiesta una amplia diferencia genética y de condiciones ambientales que se dan ‘año tras año’ (Tadeo-Robledo *et al.*, 2015; López-Morales *et al.*, 2019). Las diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2) para los cuadrados medios de todas las fuentes de variación en el análisis de varianza y prueba de Gollob, coinciden en la significancia con lo reportado en los dos modelos AMMI y SREG (Fritsche-Neto *et al.*, 2010; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

**Cuadro 2. Análisis de varianza y prueba de Gollob de los modelos AMMI y SREG para el rendimiento de grano en 36 híbridos de maíz amarillo duro en siete ambientes del Perú (2016-2018).**

Fuente	GL	SC	CM	CP <sup>1,2</sup>	GL <sup>1,2</sup>	SC <sup>1</sup>	CM <sup>1</sup>	(%) <sup>1</sup>	SC <sup>2</sup>	CM <sup>2</sup>	(%) <sup>2</sup>
Ambientes (E)	6	2137.2	356.2***	CP1	40	222.7	5.5***	45.5	535.4	13.3***	59.8
Repetición*E	2	13.4	6.7***	CP2	38	74.9	1.9***	15.3	109.7	2.8***	12.2
Genotipos (G)	35	406	11.6***	CP3	36	66.4	1.8***	13.5	71.2	1.9***	7.9
GE	210	488.8	2.3***	CP4	34	51.6	1.5*	10.5	61.3	1.8***	6.8
Error	502	462	0.9	CP5	32	41.2	1.2	8.4	44.5	1.3*	4.9

\*, \*\*\* = significancia a  $p \leq 0.05$  y  $p \leq 0.001$ , respectivamente; GE= interacción genotipo-ambiente; GL= grados de libertad; SC= suma de cuadrados; CM= cuadrados medios; CP= componentes principales; (%)= porcentaje de la SC de la interacción explicada por el CP; <sup>1</sup>= modelo AMMI; <sup>2</sup>= modelo SREG.

Para los modelos AMMI y SREG resultaron estadísticamente significativos ( $p \leq 0.001$ ) los primeros cuatro y cinco componentes principales (CP), respectivamente, lo cual significa que existe diferencia estadística por efecto de la interacción GE en términos multiplicativos, donde la suma de cuadrados de los primeros cinco CP explicaron 93.5% para AMMI y 91.9% para SREG del total de la interacción GE (Cuadro 2), resultados inferiores fueron encontrados por Fritsche-Neto *et al.* (2010); Ndhlela *et al.* (2014) y en cada uno de los modelos para el cultivo de maíz, tal diferencia puede deberse a que ellos evaluaron menor número de genotipos y ambientes con respecto al presente estudio. Los dos primeros componentes principales explicaron 60.9 y 71.1% de la variación en AMMI y SREG, respectivamente (Cuadro 2), hallazgos similares fueron reportados por Castillo *et al.* (2012); Lozano-Ramírez *et al.* (2015) en cada modelo (AMMI y SREG), quienes registraron valores de 62.6 y 79% respectivamente.

El Cuadro 3 presenta la media del rendimiento por hectárea de los 36 híbridos de maíz en cada ambiente. Los rendimientos más altos fueron obtenidos por los híbridos trilineales comerciales Dk-5005 (11.524 t ha<sup>-1</sup>) y AG-01 (11.359 t ha<sup>-1</sup>); por el contrario, el híbrido experimental 515×714 tuvo el rendimiento más bajo con 8.045 t ha<sup>-1</sup>, esto puede deberse a que este genotipo es uno de los 29 híbridos dobles que están desadaptados para las zonas evaluadas, especialmente en la sierra donde obtuvo los rendimientos más bajos.

Los 36 híbridos superaron la media nacional de rendimiento de maíz amarillo duro (riego y temporal), que es de 5.1 t ha<sup>-1</sup> (MINAGRI, 2020) y sólo 17 híbridos superaron el promedio general, que fue de 9.188 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3), entre los que destacan los tres híbridos comerciales utilizados como testigos, los cuatro híbridos comerciales de cruza doble del PIPS y 10 materiales experimentales de cruza doble. El híbrido de maíz 580×575 tuvo un rendimiento de grano de 10.042 t ha<sup>-1</sup>, ubicándose en el tercer lugar del promedio de rendimiento, siendo superado sólo por los dos híbridos trilineales comerciales Dk-5005 y AG-01, el cual superó a los cuatro híbridos del PIPS y al testigo XB-8010.

Los híbridos trilineales 30) Dk-5005 y 31) AG-01 ostentaron los mejores rendimientos de grano ( $p \leq 0.05$ ), posiblemente debido a que tienen una alta frecuencia de genes para adaptación con respecto del resto de los híbridos dobles entre ambientes, lo que está en concordancia con lo reportado por Chura y Huanuqueño (2014); López-Morales *et al.* (2019), al evaluar materiales de maíz genéticamente similares en Perú. En lo referente a los ambientes, la localidad LM-2017 tuvo la media de rendimiento más alta con 12.65 t ha<sup>-1</sup> de grano, seguida de LM-2018 con 10.337 t ha<sup>-1</sup> (únicos dos ambientes que superaron la media general de 9.188 t ha<sup>-1</sup>) en tanto que, HU-2016 tuvo el valor más bajo con 7.299 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3).

Los rendimientos de grano más altos fueron expresados por los híbridos de maíz 30) Dk-5005 (11.524 t ha<sup>-1</sup>), 31) AG-01 (11.359 t ha<sup>-1</sup>), 27) 580×575 (10.042 t ha<sup>-1</sup>) y 34) PM-9 (9.989 t ha<sup>-1</sup>), pero esta característica cambia de manera considerable de un ambiente a otro (Cuadro 3), tal comportamiento se debe al efecto que ejerce el ambiente en los genotipos. Los híbridos 30) Dk-5005 y 31) AG-01 presentaron mayores rendimientos, que concuerda con lo encontrado por Chura y Huanuqueño (2014) para Dk-5005, quienes reportaron que presentó el mayor rendimiento con 10.982 t ha<sup>-1</sup> de grano en tres localidades de La Molina y una en Puerto Bermúdez, Perú.

**Cuadro 3. Medias de rendimiento en t ha<sup>-1</sup> de 36 híbridos de maíz amarillo duro, evaluados en siete ambientes de tres provincias de Perú (2016-2018).**

Híbridos	Ambientes							Media
	LM-2016	LM-2017	LM-2018	HU-2016	HU-2017	PM-2016	CA-2016	
1) 529×508	10.126	14.531	11.207	7.24	7.953	8.113	7.106	9.468bcde
2) 685×684	8.69	11.266	8.588	7.292	8.381	7.644	6.769	8.376efg
3) 575×510	8.649	11.615	9.575	8.75	7.987	8.043	8.115	8.962bcdefg
4) 575×511	7.875	11.469	9.635	6.953	7.943	7.807	8.763	8.635cdefg
5) 515×714	7.85	11.138	8.73	7.344	7.278	7.285	6.693	8.045g
6) 722×714	9.355	12.107	8.822	8.021	8.358	10.008	7.822	9.213bcde
7) 532×531	8.378	11.674	8.793	7.708	7.473	8.051	8.608	8.669cdefg
8) 592×575	8.651	11.833	10.236	8.333	7.679	9.998	7.858	9.227bcde
9) 733×730	8.561	11.964	8.993	8.125	8.322	7.348	5.949	8.466defg
10) 725×723	8.514	12.723	10.275	6.042	8.15	6.891	7.288	8.555cdefg
11) 728×723	8.139	12.469	10.459	6.562	9.377	7.559	7.828	8.913bcdefg
12) 694×691	9.425	12.983	10.439	8.594	9.641	7.761	8.216	9.58bcd
13) 590×575	9.041	12.821	11.018	6.458	8.203	9.198	7.269	9.144bcdefg
14) 726×723	8.165	12.969	9.985	7.813	8.485	9.127	6.833	9.054bcdefg
15) 743×707	8.315	12.486	10.823	7.812	8.947	8.758	7.93	9.296bcde
16) 591×575	9.543	14.494	11.385	7.813	8.768	7.548	7.672	9.603bcd
17) 704×703	7.106	12.702	10.409	6.604	8.181	8.56	8.347	8.844cdefg
18) 513×531	7.79	11.359	9.441	7.188	8.535	8.507	6.78	8.514defg
19) 739×737	8.815	11.452	9.734	5.937	6.366	7.541	6.634	8.069fg
20) 687×684	8.849	13.135	10.7	6.927	8.673	9.695	8.221	9.457bcde

Híbridos	Ambientes							Media
	LM-2016	LM-2017	LM-2018	HU-2016	HU-2017	PM-2016	CA-2016	
21) 635×578	8.207	11.336	9.343	6.615	6.966	8.778	8.422	8.524defg
22) 589×575	9.319	12.512	11.822	7.657	8.584	7.767	8.024	9.383bcde
23) 697×691	10.238	13.592	10.624	7.135	8.549	7.638	8.953	9.533bcd
24) 570×714	8.403	11.773	8.524	6.615	8.966	9.143	7.703	8.733cdefg
25) 729×723	8.791	13.836	9.947	6.719	8.298	8.288	7.751	9.09bcdefg
26) 736×730	8.829	12.036	10.533	7.292	8.558	9.203	7.247	9.1bcdefg
27) 580×575	10.7	13.104	14.088	7.083	8.155	9.14	8.024	10.042b
28) 742×737	8.48	11.564	8.807	6.823	8.732	7.891	7.103	8.486defg
29) 717×714	8.354	11.344	9.387	8.448	8.76	9.345	7.311	8.993bcdefg
30) Dk-5005	13.392	15.926	14.125	7.24	12.851	8.943	8.19	11.524a
31) AG-01	11.514	15.476	13.064	8.489	12.221	10.38	8.37	11.359a
32) XB-8010	8.687	10.934	9.365	7.761	9.399	10.328	7.885	9.194bcdef
33) PM-212	10.848	14.188	9.238	7.605	7.564	9.421	8.906	9.681bc
34) PM-9	11.257	13.35	10.796	7.292	9.684	8.958	8.584	9.989b
35) PM-12	10.061	13.526	12.065	6.302	8.61	9.583	6.725	9.553bcd
36) PM-13	9.933	13.741	11.16	6.198	9.874	8.017	7.548	9.496bcde
Media	9.134c	12.65a	10.337b	7.299f	8.062d	8.557d	7.707e	9.188

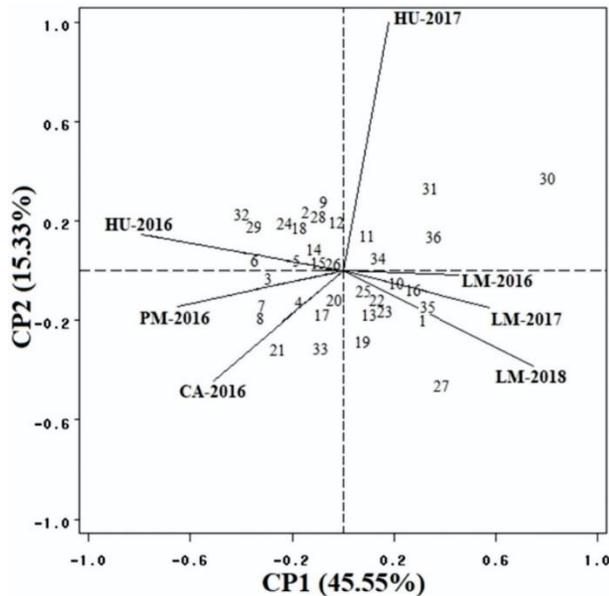
Del 01 al 29= maíces experimentales; PM= programa de maíz (PIPS); LM= La Molina; HU= Huánuco; PM= Pillco Marca; CA= Cañete. Medias de los genotipos y ambientes con letras iguales no difieren estadísticamente de la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Con diferencia significativa honesta de 1.143 t ha<sup>-1</sup> y 0.386 t ha<sup>-1</sup> entre genotipos y ambientes, respectivamente.

### Análisis AMMI

La Figura 1 muestra que los híbridos de maíz 26) 736×730, 15) 743×707, 14) 726×723 y 25) 729×723 fueron los más cercanos al origen de los ejes; es decir, estuvieron menos influidos por la GE (mayor estabilidad) (Vargas *et al.*, 2016). Todos ellos son híbridos experimentales con rendimientos promedio de 9.1, 9.296, 9.094 y 9.09 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, cercanos al promedio de los híbridos de maíz evaluados en esta investigación (9.188 t ha<sup>-1</sup>).

Los híbridos de maíz 30) Dk-5005, 31) AG-01, 36) PM-13, 27) 580×575, 32) XB-8010 y 21) 635×578 fueron los genotipos con menos estabilidad, Figura 1 dado que se concentraron alejados del centro bidimensional. Por otra parte, los híbridos 32) XB-8010, 6) 722×714 (9.213 t ha<sup>-1</sup>) y 29) 717×714 (8.993 t ha<sup>-1</sup>) presentaron baja adaptabilidad a los siete ambientes (Figura 1). El ambiente LM-2016 fue el más estable y los otros seis ambientes evaluados en el presente estudio se alejan del origen (parte central de la Figura 1), lo que indica que contribuyeron más a la interacción GE.

Autores como Vargas *et al.* (2016) indicaron que en los ambientes con ángulos < 90°, los genotipos conservarán una distribución espacial parecida, lo cual ocurrió entre los ambientes LM-2016, LM-2017 y LM-2018. Una situación similar con ángulos < 90° se presentó entre los ambientes HU-2016, PM-2016 y CA-2016. Por otra parte, los ambientes con ángulos mayores a 90° no ordenan de la misma manera a los genotipos, como sucedió con HU-2016 y HU-2017, LM-2016 o LM-2018 y CA-2016 (Figura 1).



**Figura 1. Biplot de AMMI con los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) del rendimiento promedio de 36 híbridos de maíz amarillo duro en siete ambientes de Perú.**

Los ambientes que se localizan en un ángulo de 180° ordenan de forma opuesta a los genotipos de maíz, lo cual dificulta la selección a través de estos ambientes por ser de condiciones contrastantes (Yang *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010), tal como sucedió en los ambientes LM-2016, LM-2017 y LM-2018 contra HU-2016 (Figura 1), posiblemente debido a que los primeros materiales de maíz son de la costa y el otro de la sierra del Perú.

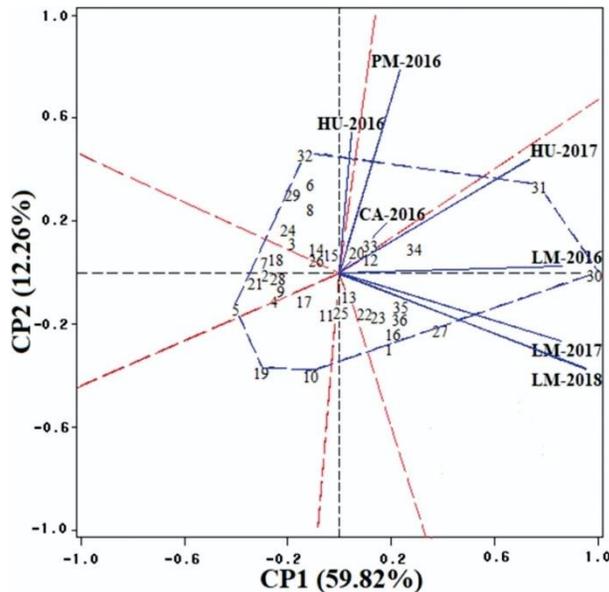
Los vectores con los grupos de los ambientes LM-2016, LM-2017 y LM-2018, así como los ambientes HU-2016, PM-2016 y CA-2016 se encuentran demasiado cercanos uno del otro, lo cual puede deberse a la similitud edafoclimática (fertilización, tipo de suelo, precipitación y temperatura con diferencias menores). Así, en el primer caso (los ambientes de La Molina), es el mismo sitio, pero evaluado en año diferente (Cuadro 1); es decir, el hecho de que los ambientes estén muy cercanos entre sí en la Figura 1 y en un cuadrante semejante (similar dirección de los vectores), significa que son muy parecidos ante la GE. En el segundo caso, los tres ambientes pertenecieron al mismo año de evaluación (2016), lo que pudo ser un factor determinante para la cercanía entre estos; resultados similares a los hallazgos del presente trabajo, fueron encontrados por Castillo *et al.* (2012); López-Morales *et al.* (2019) en las mismas condiciones.

### Análisis SREG

El híbrido de maíz 30) Dk-5005 fue el de mayor rendimiento ( $p \leq 0.05$ ); en tanto que, el híbrido 5) 515×714 tuvo el menor rendimiento. El híbrido Dk-5005 no sólo fue el de mayor rendimiento sino también el de mayor adaptabilidad y estabilidad en los siete ambientes (Figura 2).

Otros materiales estables fueron los híbridos: 21) 635×578, 2) 685×684, 7) 532×531, 18) 513×531, 28) 742×737, 26) 736×730 y 12) 694×691, todos maíces experimentales. También, en los ambientes, la longitud del vector indica la variabilidad en el rendimiento explicada en cada ambiente y viceversa (Crossa *et al.*, 2015).

Por otra parte, se encontraron seis mega-ambientes (región con ambiente homogéneo para una especie de cultivo) (Figura 2) y donde cada mega-ambiente (entre líneas rojas en la Figura 2) ubicará a los híbridos con un alto rendimiento en los vértices que formaran un polígono y todos los ambientes que están fuera de este polígono permiten la discriminación entre híbridos (Yan *et al.*, 2011; 2016).



**Figura 2. Biplot de SREG con los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) del rendimiento promedio de 36 híbridos de maíz amarillo duro en siete ambientes de Perú.**

Esto sucedió con el mega-ambiente donde el híbrido de maíz 30) Dk-5005 registró el más alto rendimiento entre genotipos ( $11.524 \text{ t ha}^{-1}$ ) e incluyó a los ambientes LM-2016 (el más estable de los cuatro, pero el único que no discriminó entre genotipos), LM-2017, LM-2018 (los tres ambientes con los mejores rendimientos de acuerdo con la prueba de Tukey:  $9.134$ ,  $12.650$  y  $10.337 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente) y HU-2017 ( $8.062 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Otros materiales con buena respuesta en el mismo mega-ambiente, con los mayores rendimientos entre los materiales evaluados, fueron los genotipos de maíz 31) AG-01 y 27) 580×575 (maíz experimental). Tanto Dk-5005 como AG-01 son híbridos trilineales con una alta frecuencia de genes por su constitución genética de tres líneas, produciendo una alta capacidad adaptativa para varias zonas, tal como lo indican los resultados de Chura y Huanuqueño (2014); López-Morales *et al.* (2019) con los materiales de tres líneas en diferentes regiones del Perú.

Los sitios PM-2016 y CA-2016 se ubicaron en un mega-ambiente, pero en este no hubo algún híbrido de maíz que sobresaliera en rendimiento, a pesar de que el ambiente PM-2016 discriminó entre híbridos. Tal comportamiento podría deberse a las grandes diferencias edafoclimáticas entre los dos ambientes, especialmente en la cantidad de precipitación (Cuadro 1). Entre el primer y segundo cuadrante del biplot de la Figura 2 se encuentra otro mega-ambiente donde el único ambiente fue HU-2016, para el cual el híbrido de maíz 32) XB-8010 fue el ideal.

Los otros tres mega-ambientes no incluyeron a ningún ambiente, probablemente porque los siete ambientes manifestaron promedios de rendimiento similares de comportamiento a un grupo de híbridos. Los híbridos ideales en cada uno de esos mega-ambientes fueron: 5) 515×714, híbrido de cruza doble con el rendimiento más bajo (8.045 t ha<sup>-1</sup>) y los genotipos 19) 739×737 y 10) 725×723, ubicados en los últimos lugares de rendimiento (con 8.069 y 8.555 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente), juntos en un solo mega-ambiente (Figura 2).

En general, en la Figura 2 los híbridos de maíces duros amarillos, ubicados en los vértices derechos son los de mayor rendimiento de grano (Dk-5005 y AG-01) y están íntimamente vinculados con los ambientes adyacentes. Las localidades se agruparon en tres de los seis mega-ambientes. Los híbridos ubicados entre los cuadrantes II y III alejados de las líneas de las localidades mostraron un pobre desempeño en el rendimiento, ya que estuvieron muy alejados de las localidades.

Los híbridos de maíz estudiados en el presente trabajo constantemente tuvieron altas calificaciones positivas en el CP1, lo que significa alta producción, y disminuciones en las puntuaciones absolutas del CP2, son indicaciones de alta estabilidad. De forma semejante, los ambientes con bajos valores absolutos en el CP2 tienen más representatividad, y altas evaluaciones positivas en el CP1 señalan mayor capacidad discriminativa de híbridos en términos del efecto principal genotípico (Yan *et al.*, 2011; 2016).

## Conclusiones

Los híbridos trilineales de maíz amarillo duro Dk-5005 y AG-01 fueron los más sobresalientes por su amplia estabilidad y adaptabilidad en la interacción genotipo-ambiente. El modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) es útil para comprender la interacción genotipo-ambiente existente en el rendimiento de grano y la discriminación de genotipos. La aplicación de SREG (sitios de regresión) fue altamente efectiva comparado con AMMI, permitiendo la identificación de seis mega-ambientes. Los tres ambientes de La Molina (LM-2016, LM-2017, LM-2018) y uno de Huánuco (HU-2017) permitieron la identificación de los genotipos de maíz con mayores rendimientos de grano. El híbrido de maíz Dk-5005 tuvo una alta estabilidad y adaptabilidad en cuatro ambientes con un rendimiento promedio de grano alto, siendo el híbrido más apropiado para la producción de grano en las zonas de costa y sierra baja del Perú.

## Literatura citada

- Camargo, B. I.; Quiros, M. E. y Gordon, M. R. 2011. Identificación de mega-ambientes para potenciar el uso de genotipos superiores de arroz en Panamá. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46(9):1061-1069. Doi.org/10.1590/S0100-204X2011000900013.
- Castillo, D.; Matus, I.; Pozo, A.; Madariaga, R. and Mellado, M. 2012. Adaptability and genotype × environment interaction of spring wheat cultivars in Chile using regression analysis, AMMI, and SREG. *Chilean J. Agric. Res.* 72(2):167-174. Doi.org/10.4067/S0718-58392012000200001.
- Chura, C. J. y Huanuqueño, C. E. H. 2014. Comportamiento de ocho poblaciones de maíz amarillo (*Zea mays* L.) en cruza con un probador. *Anales Científicos*. 76(1):78-86. Doi.org/10.21704/ac.v76i1.767.

- Crossa, J.; Vargas, M.; Cossani, C. M.; Alvarado, G.; Burgueño, J.; Mathews, K. L. and Reynolds, M. P. 2015. Evaluation and interpretation of interactions. *Agron. J.* 107(2):736-747. Doi.org/10.2134/agronj2012.0491.
- Dia, M.; Wehner, T. C. and Arellano, C. 2016. Analysis of genotype  $\times$  environment interaction using SAS programming. *Agron. J.* 108(5):1838-1852. Doi.org/10.2134/agronj2016.02.0085.
- Eberhart, S. A. and Russel, W. A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6(1):36-40. Doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.
- Farias, F. J. C.; Carvalho, P. L.; Silva, F. J. L. and Teodoro, E. P. 2016. Biplot analysis of phenotypic stability in upland cotton genotypes in Mato Grosso. *Genet. Mol. Res.* 15(2):1-10. Doi.org/10.4238/gmr.15028009.
- Fayeun, L. S.; Alake, C. G. and Akinlolu, O. A. 2018. GGE biplot analysis of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) landraces evaluated for marketable leaf yield in Southwest Nigeria. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 17(4):416-423. Doi.org/10.1016/j.jssas.2016.10.001.
- Fritsche, N. R.; Vieira, M. G.; Oliveira, D. R. and Namorato, S. H. 2010. Factor analysis and SREG GGE biplot for the genotype  $\times$  environment interaction stratification in maize. *Ciência Rural.* 40(5):1044-1048. Doi.org/10.1590/S0103-84782010000500007.
- Gómez, M. Y.; Boicet, F. T.; Tornés, O. N. y Meriño, H. Y. 2018. Interacción genotipo ambiente de cuatro variedades de tomate en la provincia Granma. *Rev. Centro Agrícola.* 45(2):21-28.
- Kandus, M.; Almorza, D.; Boggio R. R. and Salerno, J. C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *International J. Exp. Bot.* 79(1):39-46. Doi:10.32604/phyton.2010.79.039.
- Ledesma, R. L.; Solís, M. E.; Suaste, F. M. P.; Rodríguez, C. J. F. y Cruz, G. M. L. 2012. Análisis GGE biplot del rendimiento de trigo (*Triticum* spp.) con riego normal y restringido en el Bajío, México. *Agrociencia.* 46(2):119-131.
- López, M. F.; Chura, C. J. y García, P. G. 2019. Interacción genotipo por ambiente del rendimiento de maíz amarillo en híbridos trilineales, Perú. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(4):859-872. Doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1696.
- Lozano, R. Á.; Santacruz, V. A.; San-Vicente, G. F.; Crossa, J.; Burgueño, J. y Molina, G. J. D. 2015. Modelación de la interacción genotipo ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Rev. Fitotec. Mex.* 38(4):337-347. Doi.org/10.35196/rfm.2015.4.337.
- Manrique, C. P. A. 1997. El maíz en el Perú. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (CONCYTEC). Lima, Perú. 362 p.
- MINAGRI. 2020. Ministerio de Agricultura y Riego. Sistema de información de cultivos de maíz amarillo duro. Lima, Perú. <http://sissic.minagri.gob.pe/sissic>.
- Ndhlela, T.; Herselman, L.; Magorokosho, C.; Setimela, P.; Mutimaamba, C. and Labuschagne, M. 2014. Genotype environment interaction of maize grain yield using AMMI biplots. *Crop Science.* 54(5):1992-1999. Doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0448.
- Neisse, A. C.; Kirch, L. J. and Hongyu, K. 2018. AMMI and GGE biplot for genotype  $\times$  environment interaction: a medoid-based hierarchical cluster analysis approach for high-dimensional data. *Biometrical Letters.* 55(2):97-121. Doi.org/10.2478/bile-2018-0008.
- SAS Institute. 2012. User's Guide of SAS. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 550 p.
- SENAMHI. 2020. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Mapa climático nacional. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=mapa-climatico-del-peru>.

- Tadeo, R M.; Espinosa, C. A.; Guzmán, M. R.; Turrent, F. A.; Zaragoza, E. J. y Virgen, V. J. 2015. Productividad de híbridos varietales de maíz de grano amarillo para Valles Altos de México. *Agron. Mesoam.* 26(1):65-72. Doi.org/10.15517/am.v26i1.16921.
- Vallejo, C. F. A. y Estrada, S. E. I. 2002. Interacción genotipo-ambiente. *In: Vallejo, C. F. A. y Estrada, S. E. I. (Ed.). Mejoramiento genético de plantas.* Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. 189-202 pp.
- Vargas, E. E. A.; Vargas, S. J. E. y Baena, G. D. 2016. Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas agroecológicas de Colombia. *Acta Agronómica.* 65(1):72-79. Doi.org/10.15446/acag.v65n1.43417.
- Yan, W.; Pageau, D.; Frégeau, R. J.; Lajeunesse, J.; Goulet, J.; Durand, J. and Marois, D. 2011. Oat mega-environments and test-locations in Quebec. *Canadian J. Plant Sci.* 91(4):643-649. Doi.org/10.4141/cjps10139.
- Yan, W.; Frégeau, R. J.; Pageau, D. and Martin, R. 2016. Genotype-by-environment interaction and trait associations in two genetic populations of oat. *Crop Sci.* 56(3):1136-1145. Doi.org/10.2135/cropsci2015.11.0678.
- Yang, R. C.; Crossa, J.; Cornelius, P. L. and Burgueño, J. 2009. Biplot analysis of genotype environment interaction: proceed with caution. *Crop Sci.* 49(5):1564-1576. Doi.org/10.2135/cropsci2008.11.0665.