



## **Evaluación de la interacción genotipo x ambiente (IGA) del rendimiento de grano en trigos duros**

Evaluation of genotype x environment interaction (GEI) on grain yield in durum wheat

**José Luis Velasco López**

Departamento de Fitomejoramiento-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

 0000-0002-8967-1446 | ljose1924@gmail.com

**Norma Angélica Ruíz Torres**

Departamento de Fitomejoramiento-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

 0000-0002-9617-6195 | n.nruizt@gmail.com

**Pilar Espitia Hernández**

Departamento de Fitomejoramiento-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

 0000-0003-3194-3098 | pilarespitia1@gmail.com

**Mayra Alejandra Sosa Flores**

Departamento de Nutrición Animal-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

 0009-0008-6996 | mayras446@gmail.com

**Rosendo Hernández Martínez**

Campo Experimental Las Huastecas-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,  
Agrícolas y Pecuarias

 0000-0001-7541-6834 | hernandez.rosendo@inifap.gob.mx

**Marisol Galicia Juárez**

Instituto de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma de Baja California

 0000-0003-3319-3673 | marisol.galicia.juarez@uabc.edu.mx

## Resumen

El trigo es un cultivo estratégico para México, aunque su productividad está condicionada por la variabilidad ambiental. La evaluación del comportamiento genotípico en múltiples ambientes, mediante el análisis de interacción genotipo por ambiente (IGA) permite identificar materiales con mayor estabilidad y adaptación, optimizando el proceso de selección en programas de mejoramiento genético. El objetivo de este estudio fue evaluar la interacción genotipo por ambiente del rendimiento de grano de 50 genotipos de trigo duro en tres ambientes ubicados en los estados de Nuevo León y Coahuila durante dos ciclos agrícolas. Este estudio permitirá identificar y recomendar genotipos más productivos dirigidos a productores de las regiones del norte de México. Los experimentos se realizaron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, y los datos se analizaron mediante el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa). Los resultados mostraron una IGA significativa ( $p \leq 0.01$ ) para el rendimiento de grano en trigo duro. El análisis AMMI identificó nueve genotipos estables 704, 730, 719, 725, 703, 709, 722, 723 y 724 en los tres ambientes, cuyos rendimientos fueron superiores al testigo (25-41 %), mientras que los genotipos 747, 748 y 749 combinaron altos rendimientos promedio con adaptabilidad específica, superando igualmente al testigo. Estos resultados proporcionan criterios técnicos robustos para optimizar la toma de decisiones en los procesos de selección y para sustentar recomendaciones varietales para ambientes específicos acordes a las condiciones productivas de interés.

**Palabras clave:** adaptabilidad; ambiente semiárido; modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa; *Triticum durum* L.

## Abstract

The wheat is a strategic crop for Mexico; however, its productivity is strongly constrained by environmental variability. Evaluating genotypic performance across multiple environments through genotype-by-environment interaction (GEI) analysis enables the identification of materials with greater stability and adaptability, thereby optimizing selection processes in breeding programs. The objective of this study was to assess the GEI for grain yield of 50 durum wheat genotypes evaluated across three environments located in the states of Nuevo León and Coahuila over two agricultural cycles. This evaluation enables the identification and recommendation of higher yielding genotypes for producers in northern Mexico. Experiments were conducted under a randomized complete block design with three replications, and data were analyzed using the AMMI model (additive main effects and multiplicative interaction). Results showed a significant GEI interaction ( $p \leq 0.01$ ) for grain yield in durum wheat. The AMMI analysis identified nine stable genotypes (704, 730, 719, 725, 703, 709, 722, 723, and 724) across the three environments, with yields higher than the control 25-41%. In addition, genotypes 747, 748, and 749 combined high mean grain yield with specific adaptation, also outperforming the control variety. Overall, these findings provide robust technical

parameters to improve decision-making in selection processes and to support environment-specific varietal recommendations aligned with the productive conditions of interest.

**Key Words:** adaptability; additive main effects and multiplicative interaction model; semi-arid environments; *Triticum durum* L.

## Introducción

El trigo es uno de los cereales de mayor importancia para la alimentación humana, debido a su alto aporte energético y contenido de proteínas; por esta razón el 60 % de la producción mundial es destinada para el consumo humano (CANIMOLT, 2017). En México, durante el ciclo agrícola de otoño-invierno 2023-2024 se produjeron 1.87 millones de toneladas de trigo duro (*Triticum durum* L.). Cabe destacar que, en este mismo ciclo, la producción se redujo en 18 % debido a la escasez de agua para riego, aun cuando en el ciclo primavera-verano 2024 se incrementó en un 24 % la superficie sembrada respecto al año anterior; este aumento no fue relevante ya que representó solo el 3 % de la producción total del año agrícola (Perea, 2025).

Por otro lado, los datos finales del otoño-invierno 2023-2024 indicaron que en el estado de Nuevo León se sembraron 13,302 ha con un rendimiento promedio de 2.05 t ha<sup>-1</sup>; mientras que, en Coahuila se establecieron 4,865 ha con una media de 3.39 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2025). Estos valores se encuentran por debajo de la media nacional la cual fue de 6.5 t ha<sup>-1</sup>. Los bajos rendimientos obtenidos durante este ciclo se atribuyen principalmente a la disminución de agua para riego, altas temperaturas, suelos salinos, la presencia de plagas y enfermedades (SIAP, 2024).

Ante esta situación, los programas de mejoramiento genético de trigo se enfocan en desarrollar nuevos genotipos con mayor potencial productivo para las diferentes condiciones ambientales de las regiones productoras de este cultivo (Raffo & Jensen, 2023). Sin embargo, es frecuente que los genotipos demuestren un comportamiento distinto en la productividad cuando se evalúan en ambientes diferentes, a esta variación se le conoce como interacción genotipo por ambiente (IGA) (Ponce-Encinas et al., 2022). Asimismo, se han identificado genotipos que exhiben un rendimiento de grano consistente a través de múltiples ambientes, ya sea con niveles elevados o reducidos, a este fenómeno se le conoce como estabilidad. Por el contrario, también se han identificado genotipos capaces de expresar un desempeño óptimo bajo diversas condiciones ambientales, entre localidades y años, característica que se define como adaptabilidad (Ponce-Encinas et al., 2022).

Estudios previos han demostrado que la estabilidad del rendimiento está controlada genéticamente y que los genotipos con amplia adaptabilidad presentan una interacción reducida con el ambiente (Eberhart & Russell, 1966). Por esta razón, el

conocimiento de la estabilidad y la adaptabilidad resulta fundamental para la selección y recomendación de genotipos de trigo duro en distintos ambientes, localidades y años.

Por tal motivo, diversos investigadores evalúan el rendimiento de grano de los genotipos en distintas localidades y ciclos agrícolas; sin embargo, estos ensayos suelen implicar elevados costos económicos asociados al transporte, los insumos agrícolas, el manejo del cultivo, el muestreo, lotes experimentales, maquinaria, incremento de semilla, capacitación de personal local, la toma de datos y el procesamiento de muestras, entre otros. En consecuencia, diversos autores han optado por evaluar la interacción genotipo por ambiente con un número reducido de localidades y ciclos, considerando factores como densidad de siembra, tipo de suelo, dosis de fertilización y fecha de siembra, como factores ambientales (Sánchez-Cruz et al., 2022).

En este contexto, uno de los modelos más empleados para el estudio de la interacción genotipo por ambiente es el método de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI, por sus siglas en inglés) (Rodríguez-González et al., 2011), el cual consiste en la combinación del análisis de varianza con el de componentes principales bajo los supuestos que los efectos del genotipo y ambiente son aditivos y la interacción genotipo por ambiente es de naturaleza multiplicativa (Neisse et al., 2018). Por ejemplo, en evaluaciones de híbridos, el modelo AMMI detectó la interacción genotipo por ambiente existente en el rendimiento de grano en los primeros dos componentes con el 45.5 y 15.3 %, respectivamente, también se identificaron los híbridos con alta estabilidad del rendimiento de grano para tres ambientes de evaluación (Ponce-Encinas et al., 2022). En otro estudio en trigo el AMMI permitió identificar variedades de alto rendimiento y alta estabilidad, cultivares con adaptabilidad específica, y discriminar ambientes con mayor potencial para diferenciar el desempeño genotípico (Marza et al., 2017).

La aplicación rigurosa de herramientas estadísticas en el análisis del rendimiento multiambiental permite identificar con precisión genotipos que integran estabilidad y adaptabilidad frente a la variabilidad ambiental. Esta base analítica sustenta la recomendación confiable de variedades para localidades y años específicos, fortalece la toma de decisiones en los programas de mejoramiento y contribuye, en última instancia, al incremento de la productividad del cultivo a escala regional. En ese sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar la interacción genotipo por ambiente del rendimiento de grano de 50 genotipos de trigo duro en tres ambientes localizados en los estados de Nuevo León y Coahuila.

## **Materiales y Métodos**

### **Sitios y Condiciones Agroclimáticas**

Los ensayos se establecieron en tres ambientes durante los ciclos agrícolas primavera-verano 2023 (P-V 2023), otoño–invierno 2023–2024 (O-I 2023-2024) y otoño–invierno 2024–2025 (O-I 2024-2025). Los dos primeros se condujeron en el

Campo Experimental Ing. Humberto Treviño Siller de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicado en el ejido Navidad, municipio de Galeana, Nuevo León, México (1 891 m s. n. m.; 25°02'11.7" N, 100°37'37.5" W). El sitio presenta clima semiárido, con temperatura media anual de 18 °C, máximas superiores a 34 °C en verano, temperaturas invernales por debajo de 0 °C y precipitación media anual de 425 mm.

El tercer ensayo se realizó en el Rancho *El Centenario*, ejido La Concordia, municipio de San Pedro de las Colonias, Coahuila, México (1 106 m s. n. m.; 25°52'35.6" N, 103°05'14.5" W), durante el ciclo O-I 2024-2025. Esta localidad presenta clima árido cálido, con temperatura media anual de 20 °C, máximas de hasta 45 °C, mínimas invernales cercanos a niveles de 8 °C y precipitación anual promedio de 119 mm.

La evaluación en tres ambientes contrastantes se realizó con el propósito de representar la diversidad agroclimática bajo la cual se produce trigo duro en regiones irrigadas del norte y centro-norte del estado de Coahuila y sur del estado de Nuevo León. La inclusión de dos ciclos agrícolas en la localidad de Navidad permitió analizar la respuesta de los genotipos ante variación estacional en temperatura y disponibilidad hídrica, mientras que la incorporación de Concordia amplió el gradiente ambiental mediante condiciones de menor precipitación, mayor temperatura y diferente altitud. Este enfoque multiambiental fortalece la detección de la interacción genotipo por ambiente (IGA) y es metodológicamente adecuado para la aplicación del modelo AMMI, al mejorar la estimación de estabilidad y adaptabilidad y facilitar la identificación de genotipos con adaptación amplia o específica.

Los ambientes de evaluación se definieron como la combinación de localidad y ciclo agrícola: Navidad P-V 2023, Navidad O-I 2023-2024 y Concordia O-I 2024-2025 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características de los tres ambientes de evaluación durante los ciclos P-V y O-I

Ambiente	Localidad	Ciclo	Fecha de siembra	Identificación
1	Navidad, Nuevo León	PV 2023	8 julio de 2023	SNAVIPV
2	Navidad, Nuevo León	O-I 2023-2024	18 febrero de 2024	SNAVIOI
3	Concordia, Coahuila	O-I 2024-2025	23 diciembre 2024	SCONCOR

## Material genético y diseño experimental

Se evaluaron 50 genotipos de trigo duro (*Triticum durum*): 49 líneas avanzadas que se caracterizan por su alta calidad nutricional y contenido de proteína en grano, de hábito primaveral, y que son parte de un vivero internacional de rendimiento de trigo duro (IDYN, por sus siglas en inglés) proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), y como testigo se utilizó la variedad comercial CIRNO C2008, proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Tabla 3).

Los experimentos se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. Cada unidad experimental consistió en cinco hileras de 3 m de longitud, separadas a 0.30 m, lo que representó una superficie total de 4.5 m<sup>2</sup>.

### **Manejo agronómico**

La preparación del suelo incluyó un paso de arado y dos de rastra, seguido del trazado de surcos a 0.30 m. La siembra se realizó manualmente, depositando la semilla al fondo del surco y cubriéndola con suelo, utilizando una densidad de 150 kg ha<sup>-1</sup>.

La fertilización se aplicó con una dosis total de 230 kg N ha<sup>-1</sup>, 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 30 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. A la siembra se aplicó el 100 % del P y K y el 40 % del N; el 40 % del N se suministró en la etapa de encañe y el 20 % restante durante la floración.

En los ambientes de Navidad se aplicó un riego de establecimiento y ocho riegos de auxilio mediante aspersión, con una lámina total aproximada de 90 cm. En Concordia se aplicó un riego a la siembra y cinco riegos de auxilio por gravedad, con una lámina acumulada cercana a 80 cm.

El control de malezas se realizó durante el amacollamiento (35 dds, días después de la siembra) mediante la aplicación de 1.5 L ha<sup>-1</sup> de 2,4-D Amina®, cuando se observó la presencia de malezas de hoja ancha y angosta.

### **VARIABLES EVALUADAS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

El rendimiento de grano se determinó mediante la cosecha de los dos surcos centrales de cada parcela. Las muestras se trillaron con una máquina tipo Pullman® y el grano obtenido se pesó en una balanza analítica. El rendimiento se expresó en toneladas por hectárea (t ha<sup>-1</sup>).

Los datos se analizaron mediante el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) para evaluar los efectos de genotipo, ambiente y su interacción, así como la estabilidad y adaptabilidad de los genotipos. La interacción genotipo por ambiente se representó mediante biplot construidos con los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2). Cuando se detectaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los genotipos y ambientes, las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.0.

### **Resultados**

El análisis de varianza mostró efectos altamente significativos del ambiente, del genotipo y de la interacción genotipo por ambiente (IGA) sobre el rendimiento de grano (Tabla 2). El efecto de ambiente presentó el mayor cuadrado medio, lo que indica una marcada variabilidad entre las condiciones de evaluación. De igual forma, el efecto de

genotipo fue significativo, evidenciando diferencias genéticas en el rendimiento promedio.

La interacción genotipo por ambiente resultó altamente significativa, lo que confirma una respuesta diferencial de los genotipos a los ambientes evaluados. La descomposición de la IGA mediante el modelo AMMI permitió identificar dos componentes principales significativos. El primer componente principal (CP1) explicó el 82.25 % de la variación asociada a la interacción, mientras que el segundo componente (CP2) explicó el 17.75 %, acumulando el 100 % de la variación total de la IGA (Tabla 2).

**Tabla 2.** *Análisis de varianza AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) para el rendimiento de grano de 50 genotipos de trigos duros evaluados en tres ambientes.*

FV	GL	SC	CM
<b>Ambiente (AMB)</b>	2	86.06	43.03**
<b>Repetición (REP)</b>	2	8.08	4.04**
<b>REP/AMB</b>	4	6.93	1.73**
<b>Genotipo (GEN)</b>	49	65.45	1.34**
<b>IGA</b>	98	88.67	0.90**
<b>CP1</b>	50	72.93	1.46**
<b>CP2</b>	48	15.73	0.33**
<b>E.E.</b>	294	43.16	0.15
<b>%CP1</b>	50	82.25	
<b>%CP2</b>	48	17.75	
<b>Media</b>	1.44		
<b>C.V</b>	26.69		

FV= fuente de variación; GL= grados de libertad; SC= suma de cuadrados; CM= cuadrados medios; REP/AMB= repeticiones dentro de ambientes; IGA= interacción genotipo ambiente; CP1 y CP2= componentes principales 1 y 2; %CP1 y %CP2= porcentaje de varianza explicada por los componentes principales 1 y 2, respectivamente; E.E= error experimental; C.V= coeficiente de variación %; \*, \*\*= significativo ( $p \leq 0.05$ ,  $p \leq 0.01$ ).

El promedio de los genotipos evaluados mostró una amplia variación entre ambientes, con valores que oscilaron entre 0.60 y 2.30 t ha<sup>-1</sup>. Esta variabilidad refleja una respuesta diferencial de los genotipos ante las condiciones ambientales, atribuible a la interacción genotipo por ambiente. La comparación múltiple permitió la conformación de grupos estadísticos claramente diferenciados.

Los genotipos 748 y 749 registraron los mayores promedios generales (2.30 y 2.20 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente), ubicándose en el grupo estadístico superior, lo que indica un desempeño favorable y consistente en los ambientes evaluados. De manera similar, los genotipos 706, 736, 705, 745, 711, 715, 736, 738, 747 y 722 presentaron promedios elevados ( $\geq 1.50$ ), integrándose en los grupos de mayor rendimiento, superando al testigo CIRNO C2008 que presentó 1.02 t ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 3.** Promedios de rendimiento de grano de 50 genotipos de trigos duros en tres ambientes y prueba de comparación de medias combinados entre ambientes.

Genotipos	Ambientes			Promedio
	SCONCOR	SNAVIOI	SNAVIPV	
701	1.70	0.80	0.60	1.00 f-j
702	0.00	1.70	0.10	0.60 i-j
703	1.60	1.30	0.80	1.20 e-j
704	1.60	1.50	0.70	1.30 e-j
705	3.10	1.50	1.40	2.00 a-d
706	3.40	1.80	1.30	2.20 a-c
707	1.20	1.30	1.00	1.20 e-j
708	0.80	1.90	0.70	1.20 e-j
709	1.50	1.30	0.70	1.20 e-j
710	1.20	1.60	1.00	1.30 d-j
711	2.90	1.50	1.10	1.80 a-e
712	2.10	0.90	0.80	1.30 e-j
713	1.90	1.00	1.10	1.30 d-j
714	2.10	1.60	0.80	1.50 c-i
715	2.50	1.50	1.30	1.80 a-e
716	1.70	1.50	1.30	1.50 b-g
717	0.30	1.70	0.40	0.80 g-j
718	1.40	1.70	0.80	1.30 e-j
719	1.60	1.40	0.80	1.30 d-j
720	0.70	1.40	0.20	0.80 h-j
721	0.90	1.30	0.30	0.80 g-j
722	2.00	1.60	1.00	1.50 a-f
723	1.50	1.90	0.80	1.40 d-i
724	1.50	1.90	0.70	1.40 d-i
725	2.00	1.80	1.00	1.60 b-g
726	0.70	1.40	0.50	0.80 g-j
727	1.30	2.30	0.80	1.50 b-h
728	2.30	0.60	1.40	1.50 b-i
729	0.60	1.50	0.30	0.80 g-j
730	1.70	1.70	0.80	1.40 d-j
731	0.80	0.80	0.50	0.70 i-j
732	1.00	2.20	0.50	1.30 e-j
733	0.80	2.30	0.50	1.20 e-j
734	1.10	1.80	0.60	1.20 e-j
735	1.00	2.10	0.80	1.30 d-j
736	3.20	1.10	1.10	1.80 a-e
737	1.80	1.80	0.50	1.40 d-j
738	2.20	1.60	1.00	1.60 a-f
739	2.20	1.20	1.10	1.50 b-g
740	1.80	0.90	1.50	1.40 d-i
741	0.90	2.40	0.40	1.20 e-j
742	1.70	1.90	0.50	1.40 d-i
743	1.90	1.90	0.70	1.50 b-g
744	1.60	1.40	0.50	1.20 e-j

745	2.80	1.70	1.20	1.90 a-e
746	1.50	2.00	0.50	1.30 d-j
747	1.80	2.70	0.50	1.70 a-f
748	3.30	2.60	1.10	2.30 a
749	3.50	2.10	1.00	2.20 ab
750	1.00	2.70	0.80	1.50 b-i

*Nota:* Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey  $\leq 0.05$ ).

Desde la perspectiva de los ambientes de evaluación, SCONCOR favoreció la expresión de mayores valores promedio en varios genotipos, particularmente en aquellos con promedios generales superiores a 2.00 t ha<sup>-1</sup>. Por el contrario, SNAVIPV presentó de manera consistente los valores más bajos, lo que indica un ambiente más restrictivo para la expresión del rendimiento de grano. SNAVIOI mostró un comportamiento intermedio, con respuestas genotípicas contrastantes, lo que confirma la presencia de una interacción genotipo por ambiente relevante.

Por su parte las pruebas de medias de Tukey, detectaron diferencias significativas en el rendimiento promedio entre ambientes. Los ambientes SNAVIOI y SCONCOR presentaron los mayores rendimientos, con valores de 1.78 y 1.71 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos. A diferencia, SNAVIPV registró el rendimiento promedio más bajo (0.82 t ha<sup>-1</sup>), lo que indica condiciones ambientales menos favorables para la expresión del rendimiento (Tabla 4).

**Tabla 4.** Prueba de comparación de medias para el rendimiento de grano entre los tres ambientes de evaluación.

Ambiente	Rendimiento t ha <sup>-1</sup>	Agrupamiento Tukey
2) SNAVIOI	1.78	a
3) SCONCOR	1.71	a
1) SNAVIPV	0.82	b

*Nota:* Medias con la misma literal no son diferentes significativamente; (Tukey  $\leq 0.05$ ).

En conjunto, los resultados evidencian una marcada variabilidad genotípica y una respuesta diferencial a los ambientes de evaluación, lo que resalta la importancia de considerar tanto el desempeño promedio como la estabilidad relativa de los genotipos en programas de mejoramiento y recomendación varietal.

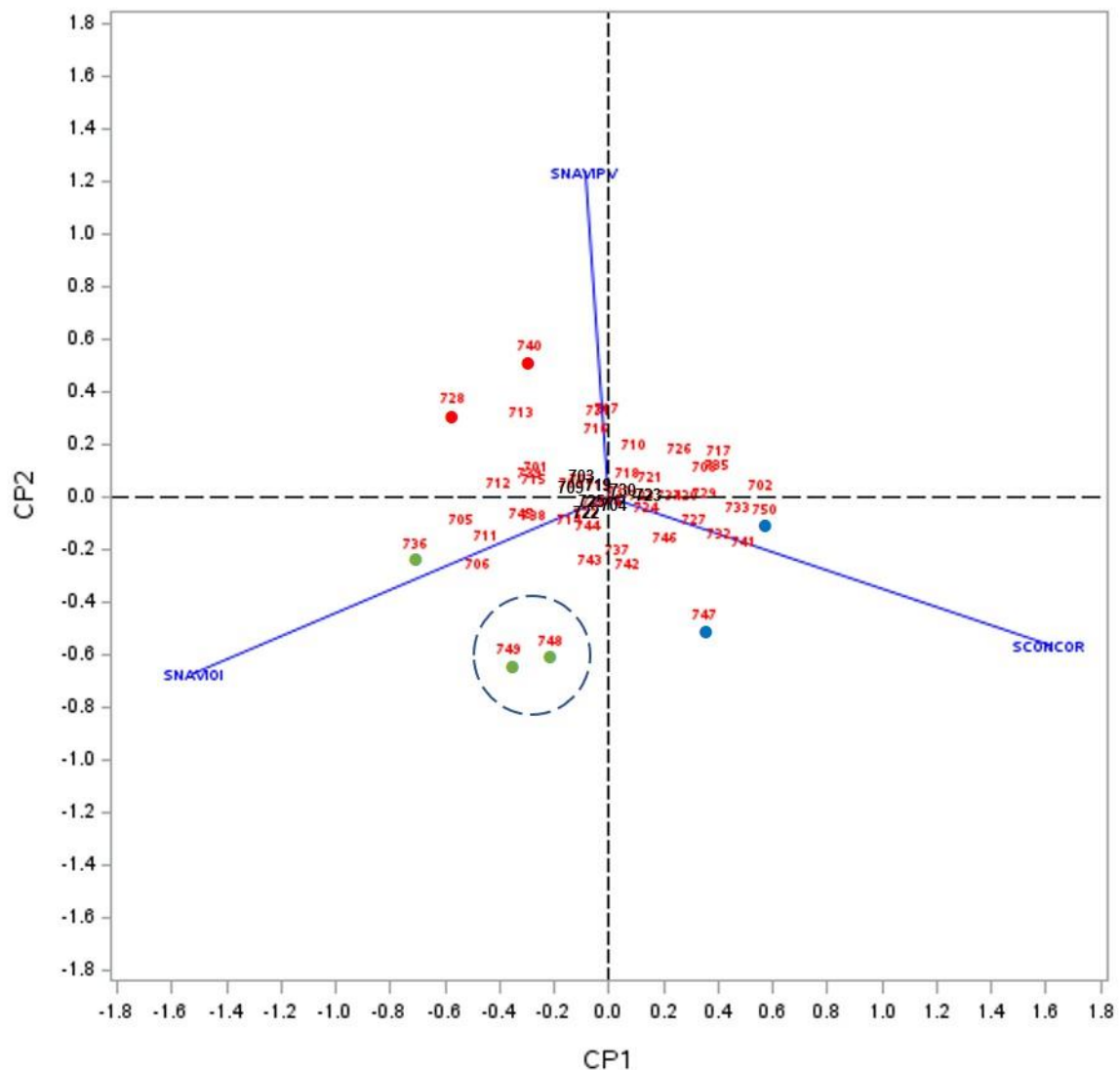
Con base en la distribución de los genotipos en el biplot AMMI (Figura 1), aquellos ubicados en las proximidades del origen de coordenadas (CP1  $\approx 0$  y CP2  $\approx 0$ ) se consideran genotipos con alta estabilidad fenotípica, al presentar una contribución mínima a la interacción genotipo por ambiente. En este grupo se identificaron principalmente los genotipos 704, 730, 719, 725, 703, 709, 722, 723 y 724, los cuales mostraron un comportamiento relativamente estable a través de los ambientes evaluados, con rendimientos de 1.27 a 1.44 t ha<sup>-1</sup>, superando al testigo CIRNO C2008 (1.02 t ha<sup>-1</sup>).

Por el contrario, los genotipos 717, 726, 702, 735, 708, 729, 723 y 720 se localizaron a mayor distancia del origen, lo que indica una mayor contribución a la interacción genotipo por ambiente y, por ende, una menor estabilidad del rendimiento entre ambientes.

Los genotipos localizados en la dirección y cercanía del vector ambiental SCONCOR, caracterizado por valores positivos elevados en CP1, mostraron adaptación específica a este ambiente. Entre ellos destacaron los genotipos 747 y 750, los cuales además presentaron altos rendimientos promedio, lo que sugiere una combinación favorable de adaptación y productividad bajo las condiciones de SCONCOR.

En el caso del ambiente SNAVIOI, cuyo vector se ubicó en el cuadrante con valores negativos de CP1 y CP2, los genotipos 736, 749 y 748 mostraron una asociación más estrecha, indicando una respuesta favorable y adaptación específica a este ambiente.

**Figura 1.** Interacción genotipo ambiente (IGA) para el rendimiento de grano en los genotipos y ambientes evaluados.



Por su parte, el ambiente SNAVIPV, localizado principalmente sobre el eje de CP2 con valores positivos, presentó una menor capacidad discriminante. No obstante, los genotipos 740 y 728, ubicados en su dirección, mostraron una respuesta relativamente más acorde a este ambiente, aunque con rendimientos promedio inferiores, lo que sugiere una adaptación limitada bajo condiciones más restrictivas.

Con respecto a los ambientes se observaron alejados del origen por lo que los tres fueron poco estables, además se observó a los vectores con ángulos mayores a  $90^\circ$  lo que indica que los ambientes no ordenaron de manera similar a los genotipos. En este estudio también se observó que el ambiente 3 (SCONCOR) ordena de manera opuesta los genotipos contra los ambientes 1 (SNAVIP) y 2 (SNAVIOI) al ubicarse con ángulos de  $180^\circ$ , esto demuestra las condiciones contrastantes de los ambientes y la dificultad para seleccionar genotipos a través de estos ambientes.

Por su parte los ambientes 1 (SNAVIP) y 2 (SNAVIOI) exhibieron poca similitud posiblemente porque es la misma localidad evaluado en ciclo agrícola diferente por lo tanto comparten similitud principalmente en el tipo de suelo, y tipo de agua de riego.

En conjunto, el análisis AMMI permitió identificar genotipos con comportamiento estable a través de ambientes, así como genotipos con adaptación específica, información clave para la toma de decisiones en programas de mejoramiento genético y recomendación varietal.

## **Discusión**

La significancia de la interacción genotipo por ambiente (IGA) observada en este estudio confirma que la expresión del rendimiento estuvo fuertemente modulada por la variabilidad ambiental, lo que resalta la necesidad de evaluar genotipos en múltiples condiciones para una adecuada caracterización de su comportamiento agronómico. Este patrón coincide con lo reportado por Rodríguez-González et al. (2011), quienes documentaron respuestas diferenciadas de genotipos de trigo al ser evaluados en diversos ambientes del valle de Mexicali, México. Asimismo, la magnitud de la IGA observada en este estudio sugiere que las condiciones entre localidades y ciclos evaluadas fueron suficientemente contrastantes como para discriminar de manera efectiva el comportamiento genotípico, lo que incrementa el valor del ensayo desde una perspectiva de selección, en concordancia con lo señalado por Ponce-Encinas et al. (2022).

El adecuado ajuste del modelo AMMI, demostrado por la explicación total de la variación de la IGA mediante los dos primeros componentes principales, respalda la idoneidad del modelo como herramienta analítica para este conjunto de datos. Más allá de un criterio estadístico, este resultado tiene implicaciones prácticas para el mejoramiento genético, ya que permite visualizar la complejidad de la interacción de manera más práctica. En este contexto, el modelo AMMI permite separar el efecto

principal del rendimiento promedio de la respuesta específica a los ambientes, lo que resulta particularmente útil para estudios de rendimiento en trigo orientados a regiones con alta heterogeneidad ambiental (Noriega-González et al., 2022).

Desde la perspectiva del mejoramiento genético, la identificación de genotipos que superaron al testigo comercial y alcanzaron rendimientos similares a los promedios regionales reportados por el SIAP (2025) para Coahuila y Nuevo León representa un resultado de relevancia práctica. Estos genotipos constituyen materiales con potencial para su avance en el proceso de selección, al combinar productividad competitiva con un desempeño consistente bajo condiciones ambientales contrastantes. Este comportamiento es consistente con lo propuesto por Fernández et al. (2019), quienes destacan la importancia de seleccionar genotipos con capacidad para mantener el rendimiento frente a variaciones en temperatura, fertilidad del suelo, calidad del agua de riego y altitud.

Las diferencias de rendimiento observadas entre ambientes pueden atribuirse, en parte, a condiciones ambientales contrastantes durante el ciclo otoño-invierno, particularmente a variaciones en el régimen térmico, lo cual coincide con lo previamente documentado por Ávila-Miramontes et al. (2014), quienes señalan que los trigos de primavera requieren temperaturas bajas entre 0° C y 10° C durante el ahijamiento (15-22 escala de Zadoks et al., 1974), ya que estas condiciones favorecen la formación de hijuelos y, por ende, una mayor densidad de espigas, con efectos positivos sobre el rendimiento de grano. Por el contrario, las temperaturas altas afectan negativamente la germinación y el vigor de las plántulas (Bischoff et al., 2015), además de menor cantidad de hijuelos por planta, provocando reducciones en el rendimiento de grano (Riaz-Ud-Din et al., 2010). Por lo tanto, la influencia de la temperatura sobre procesos fisiológicos clave de las plantas, como el ahijamiento y el periodo entre la floración y llenado de grano, puede amplificar la expresión de la IGA.

Con respecto a los ambientes se observaron condiciones contrastantes, lo que dificulta la selección de genotipos con desempeño consistente en ambientes altamente divergentes (Vargas-Escobar et al., 2016; Kandus et al., 2010).

Bajo este enfoque, el presente estudio aporta evidencia experimental que justifica la implementación sistemática de análisis AMMI como parte del proceso de evaluación, ya que permite maximizar la probabilidad de seleccionar genotipos con mayor estabilidad productiva o con adaptación específica, según los objetivos del programa. Como menciona Ponce-Encinas et al. (2022), que igual de importante es identificar materiales con estabilidad general, que con alto potencial en ambientes particulares. De igual manera, Fernández et al. (2019) recomiendan el uso de genotipos con adaptación a determinados ambientes particulares ya sean para condiciones específicas de suelos, sistemas de siembra o de clima. Ya que, la selección de genotipos con amplia adaptación corre el riesgo de descartar genotipos con alto potencial productivo en un ambiente específico.

## Conclusiones

La expresión del rendimiento de grano estuvo fuertemente condicionada por la interacción genotipo por ambiente (IGA), lo que evidenció respuestas contrastantes de los genotipos a través de los ambientes de evaluación. La aplicación del modelo AMMI permitió explicar el 100 % de la variación asociada a la IGA mediante los dos primeros componentes principales, lo que confirmó la naturaleza de la respuesta genotípica y facilitó la discriminación entre estabilidad y adaptabilidad. En este contexto, los genotipos 704, 730, 719, 725, 703, 709, 722, 723 y 724 mostraron alta estabilidad fenotípica, con rendimientos consistentemente superiores al del testigo, mientras que los genotipos 747, 748 y 749 combinaron altos rendimientos promedio con adaptabilidad específica, asociándose a ambientes de mayor potencial productivo, superando igualmente al testigo. Por lo tanto, algunos de estos genotipos presentan potencial para ser recomendados a los productores de trigo duro en las regiones de estudio.

Estos resultados proporcionan criterios técnicos robustos para optimizar la toma de decisiones en los procesos de selección dentro de los programas de mejoramiento genético de trigo y para sustentar recomendaciones varietales más precisas, dirigidas a ambientes específicos y alineadas con las condiciones productivas de interés.

## Referencias

- Ávila-Miramontes, J. A.; Ávila-Salazar, J. M.; Rivas-Santoyo, F. J. y Martínez-Heredía, D. (2014). *El cultivo del trigo: Sistema de Producción en el Noreste de México*. Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, (en línea). Disponible en:
- Bischoff, T. Z.; Mourão, A. P. y Nuernberg, P. H. (2015). Influencia de las diferentes temperaturas en el desarrollo de semillas de trigo. *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 24, n. 1, p. 12-15. Disponible en:
- CANIMOLT, Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. (2017). Reporte estadístico 2017 [Informe]. CANIMOLT. Disponible en:
- Eberhart, S. A. and Russel, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, vol 6, n. 1, p. 36-40. Disponible en:
- Fernández, M. Á.; Zingaretti, O. y Riestra, D. (2019). La estabilidad de rendimiento en grano de cereales invernales en la región subhúmeda seca pampeana. *Revista Semiárida*, vol. 29, n.1, p. 19-32. DOI: [https://doi.org/10.19137/semiarida.2019\(01\).19-32](https://doi.org/10.19137/semiarida.2019(01).19-32)  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000200015&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200015&lng=es&tlng=es)  
<https://agricultura.unison.mx/memorias%20de%20maestros/EL%20CULTIVO%20DEL%20TRIGO.pdf>  
<https://doi.org/10.1002/csc2.20986>

<https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>

<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3070>

<https://www.canimolt.org/compendio-estadistico-completo>

<https://www.fceqyn.unam.edu.ar/recyt/index.php/recyt/article/view/355/258>

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/953038/Trigo\\_Cristalino\\_Sep\\_2024.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/953038/Trigo_Cristalino_Sep_2024.pdf)

[https://www.researchgate.net/publication/266468157\\_Effect\\_of\\_temperature\\_on\\_development\\_and\\_grain\\_formation\\_in\\_spring\\_wheat](https://www.researchgate.net/publication/266468157_Effect_of_temperature_on_development_and_grain_formation_in_spring_wheat)

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.). *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, vol. 79, n. 1, p. 39-46. Disponible en: <https://doi.org/10.32604/phyton.2010.79.039>

Marza, F.; Butrón, R.; Quispe, F.; Gutiérrez, G.; y Vaca, L. (2017). Rendimiento y estabilidad fenotípica de diez variedades internacionales de trigo harinero en zonas trigueras de Bolivia, 2015-2016. *Revista de investigación agropecuaria y forestal boliviana*, vol. 4, n. 9, p. 22-34.

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*, vol. 55, n. 2, p. 97-121. Disponible en: <https://doi.org/10.2478/bile-2018-0008>

Noriega-González, L.A.; Vázquez-Hernández, M.C.; Flores-Gómez, C. A; Gámez-Vázquez A. J.; Solís-Moya, E. (2022). Calendarios de riego sobre la expresión del rendimiento en diez genotipos de trigo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, vol. 10, n. 1, p. 1-13. Disponible en: <https://www.somecta.org.mx/rev-ciencia-y-tecnol-agrop-mexico/revistas/2022-1/2022-1-1/>

Perea, E. (2025). Producción de trigo en México caerá 25 % en el ciclo 2024/25: FIRA. *Imagen Agropecuaria*. Recuperado el 12 de septiembre de 2025. Disponible en: <https://imagenagropecuaria.com/2025/produccion-de-trigo-en-mexico-caera-25-en-el-ciclo-2024-25/>

Ponce-Encinas, M. C.; López-Morales, F.; Chura-Chuquiya, J.; Hernández-Leal, E.; Hernández-Salinas, G. y Aragón-García, A. (2022). Interacción genotipo-ambiente del rendimiento en híbridos de maíz amarillo mediante AMMI y SREG. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 13, n. 7, p. 1247-1258.

Raffo, M. A. and Jensen, J. (2023). Gene  $\times$  gene and genotype  $\times$  environment interactions in wheat. *Crop Science*, vol. 63, n. 4, p. 1779-1793. Disponible en:

Riaz-Ud-Din, G. M. S.; Ahmad, N.; Hussain, M. and Rehman, A. U. (2010). Effect of temperature on development and grain formation in spring wheat. *Pakistan Journal of Botany*, vol. 42, n. 2, p. 899-906. Disponible en:

Rodríguez-González, R. E.; Ponce-Medina, J. F.; Rueda-Puente, E. O.; Avendaño-Reyes, L.; Paz-Hernández, J. J.; Santillano-Cazares, J. y Cruz-Villegas, M. (2011). Interacción genotipo-ambiente para la estabilidad de rendimiento en trigo en la región de Mexicali, B.C., México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, vol. 14, n. 2, p. 543-558. Disponible en:

Sánchez-Cruz, M. G.; Zamora-Villa, V. M.; Torres-Tapia, M. A.; Colín-Rico, M. y Lozano-del Río, A. J. (2022). Agrupamiento de trigos mediante sensores infrarrojos y fracciones de forraje en tres muestreos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 13, n. 1, p. 65-76. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2379>

SAS Institute Inc. 2013. Versión 9.2. Cary, NC, Estados Unidos. SAS.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). Producción de trigo en México: estadísticas y tendencias [Informe]. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección General de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 12 de septiembre de 2025. Disponible en:

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). Producción de trigo en México: estadísticas y tendencias [Informe]. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección General de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado el 12 de septiembre de 2025. Disponible en: [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/)

Vargas-Escobar, E. A.; Vargas-Sánchez, J. E. y Baena-García, D. (2016). Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas agroecológicas de Colombia. *Acta Agronómica*, vol. 65, n. 1, p. 72-79. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.43417>

Zadoks, J. C.; Chang, T. T. and Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* Vol. 14, n. 6, p. 415-421.