

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
CENTRO REGIONAL UNIVERSITARIO DE LOS SANTOS**

**EVALUACIÓN DE LÍNEAS AVANZADAS DE ARROZ BIOFORTIFICADO PARA LA  
SOSTENIBILIDAD EN ÁREAS DE POBREZA RURAL**

**POR:**

**ELIS COLOMBIA ROJAS**

**CÉDULA: 7- 701- 184**

**PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTENER EL  
GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ENFACIS EN  
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA SOSTENIBLE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**APROBADO POR**

\_\_\_\_\_ **ASESOR**

**PhD. ISMAEL CAMARGO BUITRAGO.**

\_\_\_\_\_ **JURADO**

**MSc. LUIS ALBERTO BARAHONA AMORES**

\_\_\_\_\_ **JURADO**

**PhD. JOSE E. VILLARREAL NÚÑEZ**

**2025**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo, fruto de esfuerzo, perseverancia y fe, a Dios Todopoderoso, quien me ha enseñado que los caminos de la vida no siempre son fáciles, pero que, con devoción y confianza en Él, es posible avanzar y alcanzar nuestras metas.

A mi madre, mis hermanos y, en especial, a mi sobrina **Sheyla Valentina**, por ser fuente constante de motivación y alegría.

A los profesores que, con paciencia, entrega y vocación, imparten sus conocimientos y nos inspiran a seguir luchando por nuestros sueños.

Al profesor Rubén Samaniego, por su guía, sus valiosos consejos y su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

A mis abuelos y familiares que ya no están físicamente, pero que me acompañan desde el cielo con su amor y bendiciones, y a todas aquellas personas que Dios ha puesto en mi camino, quienes, con sus palabras, gestos y compañía, fueron un soporte fundamental en los momentos más desafiantes.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco, en primer lugar, a **Dios**, por brindarme la sabiduría, la paciencia y, sobre todo, la fortaleza para continuar adelante en cada etapa de este proceso académico. Gracias por guiarme hacia el tema adecuado y rodearme de personas clave que hicieron posible este trabajo.

Agradezco al **IPTA de Tonosí**, por facilitar las parcelas necesarias para el desarrollo de esta investigación, y al **IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá)** por proveer los recursos indispensables que permitieron llevar a cabo este estudio.

Mi sincero reconocimiento al **MSc. Luis Alberto Barahona Amores**, asesor y compañero de camino, por compartir su conocimiento, orientación y constante apoyo a lo largo de este trabajo.

Al **Dr. Ismael Camargo**, director de esta investigación, gracias por su generosidad, dedicación, y por ese don especial para enseñar y acompañar con el corazón.

Finalmente, al **Dr. José Villarreal**, por sus valiosas sugerencias, disposición y colaboración, fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto.

## INDICE GENERAL

1. <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	3
2. <i>OBJETIVOS</i> .....	5
2.1 Objetivo general .....	5
2.1.1 Objetivos específicos .....	5
3. <i>REVISIÓN DE LITERATURA</i> .....	6
3.1 Aspectos generales del arroz.....	6
3.1.1 Morfología del arroz .....	6
3.1.2 Producción y consumo de arroz a nivel mundial y regional .....	7
3.2 Biofortificación del arroz: fundamentos y estrategias globales .....	8
3.3 Producción y adopción del arroz biofortificado en América Latina .....	9
3.4 Panorama del arroz biofortificado en Panamá.....	10
3.5 Generación y características de los cultivares de arroz biofortificado en Panamá .....	10
4. <i>MATERIALES Y MÉTODOS</i> .....	12
4.1 Localización geográfica.....	12
4.2 Material genético .....	12
4.3 Arreglo de campo.....	13
4.4 Diseño experimental .....	14
4.5 Variables de respuestas.....	15
4.6 Características de los suelos .....	17
4.7 Análisis estadísticos.....	18
5. <i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i> .....	19
6. <i>CONCLUSIONES</i> .....	31
7. <i>RECOMENDACIONES</i> .....	32

8. BIBLIOGRAFÍA.....	33
9. ANEXOS.....	40

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Localización de los ensayos de evaluación de arroz biofortificado.....	12
Cuadro 2. Genotipos de arroz biofortificados a evaluar.....	13
Cuadro 3. Sorteo o distribución aleatoria de los genotipos de arroz biofortificados (GAB).....	15
Cuadro 4. variables de respuesta empleadas en la evaluación de genotipos de arroz biofortificado.....	16
Cuadro 5. Características Físicas Químicas del suelo de las diferentes localidades.	18
Cuadro 6. Análisis de varianza (cuadrados medios) de variables agronómicas y fitosanitarias en arroz.....	20
Cuadro 7. Valores medios de las variables agronómicas y reacción a enfermedades y características nutricionales de los cultivares evaluados, según número de tratamiento. ....	22
Cuadro 8. Análisis de varianza tipo IV y componentes principales (PCA) para la variable rendimiento de granos.....	26
Cuadro 9. Valores medios de las variables agronómicas y reacción a enfermedades por localidad.....	27
Cuadro 10. Rendimiento total y otras características industriales de los cultivares evaluados en 6 Localidades. ....	29

## INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Biplot de Componentes Principales: Interacción Genotipo × Ambiente para los 12 tratamientos en las 6 localidades. ....	23
Gráfica 2. Rendimiento de grano y separación de medias en tratamientos evaluados. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Gráfica 3. Separación de medias por localidad para la variable rendimiento de grano. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Siembra del ensayo.....	40
ANEXO 2. Vista aérea del ensayo.....	41
ANEXO 3. Toma de datos. ....	42
ANEXO 4. Arreglo para la cosecha del ensayo .....	43
ANEXO 5. Cosecha del ensayo.....	44
ANEXO 6. Secado de muestras de arroz .....	45
ANEXO 7. Limpieza de muestras de arroz.....	46
ANEXO 8. Aparato para medir la forma del grano.....	47
ANEXO 9. Pesado de muestras de arroz .....	48

## RESUMEN

La presente investigación evaluó la adaptabilidad, estabilidad y calidad molinera de doce líneas avanzadas de arroz biofortificado con hierro y zinc bajo condiciones de secano en seis localidades representativas de zonas rurales en pobreza y pobreza extrema de Panamá. El objetivo fue identificar genotipos superiores con potencial para mejorar la seguridad alimentaria y nutricional en contextos vulnerables. Se utilizó un diseño experimental BCA con arreglo tipo Alfa-Lattice con tres repeticiones, aplicándose análisis de varianza combinados, comparación de medias (DMS,  $P < 0,05$ ) y el modelo Biplot GGE para interpretar la interacción genotipo  $\times$  ambiente (G $\times$ A). Los resultados revelaron diferencias altamente significativas entre genotipos para variables como rendimiento de grano, resistencia a enfermedades y características industriales del grano. Las líneas GAB88-18 y GAB13-18 se destacaron por su alto rendimiento, buena calidad molinera y relativa estabilidad en diversos ambientes. En particular, GAB88-18 presentó el mayor porcentaje de grano entero y menor proporción de grano quebrado, lo que la posiciona como una de las opciones más promisorias. Asimismo, se observaron diferencias en contenido de micronutrientes, destacando GAB71-18 y GAB76-18 por su mayor concentración de zinc y hierro, respectivamente, lo cual refuerza el valor nutricional de estas líneas. La expresión del rendimiento fue fuertemente influenciada por el ambiente, validando la importancia de realizar evaluaciones multilocales para seleccionar materiales consistentes. Los resultados del estudio respaldan el uso del arroz biofortificado como herramienta efectiva para enfrentar deficiencias nutricionales crónicas en poblaciones rurales. Además, se proponen líneas con potencial para ser validadas a nivel de agricultura familiar y liberadas en el país, en el marco de estrategias de manejo agrícola sostenible y nutrición inclusiva.

**Palabras claves:** Adaptabilidad, estabilidad, interacción genotipo  $\times$  ambiente, seguridad alimentaria, rendimiento de grano, calidad molinera.

## ABSTRACT

This study evaluated the adaptability, stability, and agronomic performance of twelve advanced biofortified rice lines under rainfed conditions in six representative rural locations in Panama, characterized by poverty and extreme poverty. The objective was to identify superior genotypes with potential to enhance food and nutritional security in vulnerable areas. An alpha-lattice randomized complete block design with three replications was used, along with combined analysis of variance and the GGE Biplot model to interpret genotype  $\times$  environment (G $\times$ E) interaction. Results revealed highly significant differences among genotypes for key variables such as grain yield, disease resistance, and grain industrial quality. Lines GAB88-18, GAB-11, and GAB13-18 stood out due to their high yield, good milling quality, and relative stability across diverse environments. Notably, GAB88-18 exhibited the highest percentage of whole grains and the lowest proportion of broken grains, positioning it as one of the most promising candidates for the agro-industry. Additionally, differences in micronutrient content were observed, with GAB71-18 and GAB76-18 standing out for their higher concentrations of zinc and iron, respectively-reinforcing the nutritional value of these lines. Grain yield was strongly influenced by environmental conditions, validating the importance of multilocation testing to select consistent-performing materials. The results support the use of biofortified rice as an effective tool to address chronic micronutrient deficiencies in rural populations. Furthermore, specific lines are proposed for pre-commercial validation and potential release as part of sustainable agricultural and inclusive nutrition strategies.

**Keywords:** Adaptability, stability, genotype  $\times$  environment interaction, food security, grain yield, milling quality.

# 1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial y constituye un alimento básico para millones de personas. En Panamá, destaca por su valor económico y por su papel estratégico en la seguridad alimentaria. El consumo per cápita anual es de 64,7 kg, reflejando su relevancia cultural y nutricional (Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC], 2024). En el ciclo agrícola 2023–2024 se sembraron 84,509.10 hectáreas, lo que representa el 41,5 % de la superficie agrícola nacional (Ministerio de Desarrollo Agropecuario [MIDA], 2024).

En 2012, Panamá declaró el arroz como cultivo de seguridad alimentaria. Sin embargo, en zonas rurales donde su consumo es elevado, persisten altos niveles de pobreza y deficiencias de micronutrientes como hierro (Fe) y zinc (Zn). Frente a ello, la biofortificación mediante mejoramiento genético surge como una estrategia sostenible, eficaz y de bajo costo para mejorar la calidad nutricional del arroz (Bouis & Saltzman, 2017).

Iniciativas como AgroSalud, HarvestPlus, junto al CIAT, y el Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), han desarrollado líneas avanzadas de arroz biofortificado con mayores contenidos de micronutrientes, además de buenas características agronómicas como alto rendimiento, resistencia a plagas y calidad molinera. Estas variedades pueden beneficiar a comunidades rurales donde el arroz es la base alimentaria.

Para lograr su adopción exitosa, es fundamental evaluar la adaptabilidad y estabilidad de estas líneas en condiciones de secano, típicas de muchas regiones productoras del país. La interacción genotipo  $\times$  ambiente (G $\times$ A) influye directamente en el rendimiento y desempeño agronómico, por lo que entenderla permite identificar genotipos estables y predecibles en distintos entornos (Yan & Kang, 2003; Gauch Jr et al., 2008).

Se utilizan modelos estadísticos como AMMI (Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa) y GGE Biplot para analizar esta interacción. AMMI combina análisis de varianza y componentes principales, mientras que GGE Biplot permite visualizar gráficamente el comportamiento de los genotipos y su interacción con los ambientes (Yan et al., 2000; Gauch Jr, 2013). Estas herramientas son claves para seleccionar líneas superiores.

Además, la resistencia genética es fundamental en el manejo integrado de plagas y enfermedades, y su combinación con prácticas agroecológicas fortalece la sostenibilidad (Blanco Fuentes, 2017). El IDIAP ha sido protagonista en este proceso: en la zafra 2023–2024, el 49 % de las 86,804 hectáreas sembradas usaron variedades desarrolladas por esta institución (Panamá América, 2023).

Este estudio busca identificar líneas avanzadas de arroz biofortificado con hierro y zinc, alto potencial en secano, que aporten a la sostenibilidad agrícola y mejoren la nutrición en comunidades vulnerables.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

- Evaluar la adaptabilidad y estabilidad de líneas avanzadas de arroz biofortificado con hierro y zinc en seco, con la finalidad de identificar genotipos superiores bajo diversos ambientes de Panamá.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Comparar y correlacionar entre sí los parámetros de adaptabilidad y estabilidad de las líneas avanzadas de arroz biofortificado bajo seco.
- Seleccionar líneas avanzadas de arroz biofortificado con resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades; con alto potencial de rendimiento y con buenas características molineras y culinarias.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Aspectos generales del arroz

##### 3.1.1 Morfología del arroz

El arroz (*Oryza sativa* L.), perteneciente a la familia Poaceae (Gramíneas), es una planta monocotiledónea herbácea de ciclo anual, ampliamente cultivada por su grano comestible. Su morfología ha sido objeto de estudio debido a su importancia agronómica y su adaptación a diferentes condiciones agroecológicas (Juliano, 1993; International Rice Research Institute [IRRI], 2007).

**Sistema radical:** El sistema radicular es fasciculado, compuesto por raíces finas, fibrosas y ramificadas. Se distingue entre raíces seminales, de carácter temporal, que emergen a partir de la radícula durante la germinación, y raíces adventicias o nodales, que se originan en los nudos basales del tallo y constituyen el sistema radicular principal en la etapa vegetativa. Estas últimas presentan una ramificación libre y eficiente para la absorción de agua y nutrientes, especialmente en suelos anegados (Yoshida, 1981).

**Tallo:** El tallo, denominado culmo, es cilíndrico, erecto, glabro y está compuesto por una serie de nudos y entrenudos alternados. Su longitud varía entre 60 y 120 cm, aunque puede superar esta medida dependiendo del cultivar y las condiciones de cultivo. Los nudos son macizos y los entrenudos huecos, característica común de las gramíneas (IRRI, 2007).

**Hojas:** Las hojas son alternas, envainadoras, de tipo lineal y con limbo plano, largo y agudo. En la unión entre la vaina foliar y el limbo se encuentra una lígula membranosa, bífida y erguida, acompañada frecuentemente por aurículas con pelos sedosos (cirros), que pueden servir como carácter diagnóstico entre variedades (Juliano, 1993).

**Inflorescencia:** La inflorescencia del arroz es una panícula terminal compuesta, la cual puede presentar ramificación primaria y secundaria. Su estructura está formada por espiguillas unifloras dispuestas a lo largo de un eje central. La espiguilla, unidad básica de la panícula, contiene dos glumas estériles en la base y una flor fértil protegida por una lema y una palea aquilladas. Durante la floración, la panícula suele adoptar una disposición colgante debido al peso de los granos en desarrollo (Yoshida, 1981).

**Flores:** Las flores son hermafroditas, de pequeño tamaño y color verde blanquecino. La gluma basal está constituida por dos valvas pequeñas, cóncavas, lisas y aquilladas. La flor está encerrada entre la lema y la palea, y presenta tres estambres y un pistilo con dos estigmas plumosos. La fecundación es predominantemente autógama (IRRI, 2007).

### **3.1.2 Producción y consumo de arroz a nivel mundial y regional**

El arroz es uno de los cultivos más antiguos del mundo, con evidencia de domesticación hace más de 4,000 años en Asia oriental (Gross & Zhao, 2014). Existen más de 7,000 variedades de arroz con diferencias en sabor, textura, tamaño del grano y adaptabilidad agroecológica (Juliano, 1993; Yang, 2022). Es el alimento básico para más de la mitad de la población mundial, fuente principal de energía calórica y

elemento clave de la seguridad alimentaria en Asia, África y América Latina (FAO, 2022).

Según la FAO, (2023), la producción mundial de arroz para el ciclo 2023/2024 se estima en 523,5 millones de toneladas, aunque la incertidumbre climática ha limitado los rendimientos en algunas regiones. El comercio internacional del arroz se redujo en 2023 en un 4,3 %, pero el consumo alimentario alcanzó 520,1 millones de toneladas.

En Panamá, el arroz es el principal alimento de la dieta nacional, con un consumo per cápita de 64,7 kg/año (Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC], 2023). Representa un gasto significativo en los hogares panameños y es uno de los cultivos de mayor importancia económica y social, cultivado en más de 90.000 hectáreas. En 2018, se declaró cultivo de seguridad alimentaria mediante la Ley N.º 17, con lo cual se impulsaron políticas de producción nacional, adaptación varietal y biofortificación.

### **3.2 Biofortificación del arroz: fundamentos y estrategias globales**

La biofortificación del arroz es una estrategia sustentable para mejorar la calidad nutricional del grano y enfrentar la deficiencia de micronutrientes, especialmente hierro, zinc y vitamina A (WHO, 2020). A diferencia de la fortificación industrial, esta técnica integra los nutrientes desde la semilla y no requiere cambios en los hábitos alimentarios ni genera costos adicionales (HarvestPlus, 2020).

Programas como HarvestPlus, en colaboración con el CIAT y el IRRI, han promovido el desarrollo de variedades biofortificadas en países de Asia, África y América Latina. En Suiza se obtuvieron líneas con hasta seis veces más hierro (Trijatmiko et al., 2016).

En Bolivia, Nicaragua y Colombia se liberaron variedades con alto contenido de hierro y zinc, buena calidad molinera y aceptación agronómica (Herrera Córdoba et al., 2011; CGIAR Research Program on Agriculture for Nutrition and Health, 2019; Alianza de Bioversity International y el CIAT, 2021).

El mejoramiento genético convencional, junto con modelos como AMMI y GGE Biplot, permite identificar genotipos con alta adaptabilidad y estabilidad en diversos ambientes (Becker, 1981; Yan & Tinker, 2006; Gauch et al., 2008).

### **3.3 Producción y adopción del arroz biofortificado en América**

#### **Latina**

La biofortificación ha ganado relevancia en América Latina como solución sostenible frente a la "hambre oculta" (Bouis & Saltzman, 2017). Países como Brasil, Colombia, Guatemala y Panamá han desarrollado y validado variedades adaptadas a sus condiciones locales, con apoyo de centros de investigación y políticas nacionales.

Los cultivares biofortificados ofrecen beneficios a lo largo de la cadena agroalimentaria: alto rendimiento, tolerancia a estrés abiótico, buen perfil nutricional y características culinarias apreciadas (HarvestPlus, 2020). También se ha impulsado su integración en programas sociales, foros regionales y políticas públicas, como la fortificación obligatoria del arroz en Costa Rica y Panamá (World Food Programme [WFP], 2016; Global Alliance for Improved Nutrition [GAIN], 2022).

### **3.4 Panorama del arroz biofortificado en Panamá**

En Panamá, la producción de arroz biofortificado responde a desafíos estructurales como pobreza rural, desnutrición crónica y baja diversificación alimentaria. Con apoyo técnico inicialmente de AgroSalud y posteriormente de HarvestPlus y bajo el liderazgo del proyecto AgroNutre Panamá, se introdujo germoplasma biofortificado y se desarrollaron líneas adaptadas a las condiciones locales (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá [IDIAP], 2020).

Entre 2014 y 2017 se distribuyeron más de 173 toneladas de semillas en más de 800 comunidades, junto con capacitaciones agronómicas y programas IDIAP de educación nutricional. Panamá cuenta actualmente con dos variedades biofortificadas registradas, como IDIAP-GAB-6 e IDIAP-GAB-11, lo que consolida el avance de esta estrategia. Estudios de aceptación muestran alta preferencia por estas variedades, lo que apoya su sostenibilidad y escalabilidad.

### **3.5 Generación y características de los cultivares de arroz biofortificado en Panamá**

El desarrollo de variedades de arroz en el trópico es un proceso dinámico condicionado por factores bióticos y abióticos que requieren respuestas rápidas para mantener la rentabilidad y la seguridad alimentaria. En Panamá, el cultivo de arroz comercial abarca todas las provincias, siendo Chiriquí la de mayor producción, seguida por Coclé y Veraguas.

Las variedades biofortificadas panameñas muestran alta adaptabilidad desde zonas costeras hasta 1000 m.s.n.m. En seco con riego asistido (chuzo), el ciclo vegetativo es de 135–150 días, y en fangueo se reduce a 125–135 días (Gordon & Camargo, 2012).

Agronómicamente, presentan porte semi-enano (73–105 cm), tallos fuertes, macollamiento medio, panículas semicompactas y granos pubescentes de 9–10 mm en cáscara y 6–8 mm descascarados. Son moderadamente resistentes a piricularia y presentan buena calidad molinera.

Nutricionalmente, su contenido de zinc permite cubrir entre el 60 % y 80 % de los requerimientos diarios estimados (EAR) para mujeres y niños (Bouis & Saltzman, 2017). Estas características, junto con su buena aceptación culinaria, posicionan al arroz biofortificado como una herramienta clave en los programas de seguridad alimentaria del país.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Localización geográfica

El estudio se llevó a cabo en seis localidades representativas de las principales regiones productoras de arroz bajo este sistema, ubicadas en zonas clasificadas como de pobreza y pobreza extrema (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Localización de los ensayos de evaluación de arroz biofortificado.**

Localidad	Distrito	Provincia	Coordenadas UTM (WGS-84)	
			X	Y
El Cacao	Tonosí	Los Santos	565059	821880
La Esperanza	Barú	Chiriquí	297859	934376
Guarumal	Alanje	Chiriquí	327488	925177
Remedios	Remedios	Chiriquí	409603	911434
Trinchera	Soná	Veraguas	469139	862742
Martina	Penonomé	Coclé	571253	930431

### 4.2 Material genético

El grupo de cultivares experimentales de arroz biofortificado evaluado en este estudio procedió del proyecto AgroSalud (ION-CIAT) ejecutado en colaboración entre CIAT, IDIAP, SENACYT y el Patronato Nacional de Nutrición. Asimismo, se incluyeron como testigos una variedad de arroz biofortificado previamente liberadas por el IDIAP y un testigo regional propuesto por CIAT (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Genotipos de arroz biofortificados a evaluar.**

Tratamiento	Código	Codificación nacional	Procedencia
1	BIO-1	GAB70-18	ION-CIAT
2	BIO-2	GAB16-18	ION-CIAT
3	BIO-3	GAB76-18	ION-CIAT
4	BIO-4	GAB37-18	ION-CIAT
5	BIO-5	GAB88-18	ION-CIAT
6	BIO-6	GAB71-18	ION-CIAT
7	BIO-7	GAB13-18	ION-CIAT
8	BIO-8	GAB69-18	ION-CIAT
9	BIO-9	GAB34-18	ION-CIAT
10	BIO-10	GAB18-18	ION-CIAT
11	I-GAB-11 (testigo)	IDIAP GAB-11	IDIAP
12	IR-64 (testigo)	IR-64	CIAT

### **4.3 Arreglo de campo**

La unidad experimental consistió en una parcela conformada por cuatro hileras de cinco metros de longitud, con una separación de 0,20 metros entre hileras, lo que resultó en un área total de 4 m<sup>2</sup>. La parcela útil estuvo compuesta por las dos hileras centrales, a las cuales se les eliminó 0,50 metros en cada extremo para minimizar el efecto de borde, obteniéndose así un área efectiva de 1,6 m<sup>2</sup>.

La densidad de siembra utilizada fue de 2 gramos por metro lineal, lo que equivale a una tasa de siembra de 100 kilogramos por hectárea. El mismo grupo de cultivares experimentales de arroz biofortificado, junto con los testigos, fueron evaluado de forma repetida en todas las localidades seleccionadas.

El manejo agronómico de fertilización y control de malezas se efectuó conforme a la tecnología validada por el IDIAP para las diferentes regiones productoras del grano (Camargo et al., 2014). Las enfermedades no fueron controladas, con el objetivo de

permitir la diferenciación genética entre genotipos resistentes y susceptibles. En cuanto a las plagas, su control se aplicó únicamente en situaciones de infestación severa, con el fin de evitar la pérdida total del experimento sin alterar significativamente la presión biótica natural.

El ensayo se desarrolló bajo condiciones de secano tradicional, dependiendo exclusivamente de las lluvias estacionales. No se aplicó riego suplementario en ninguna localidad, con el propósito de evaluar el comportamiento de los materiales genéticos ante condiciones de estrés hídrico, utilizando el rendimiento de grano como variable indicadora.

#### 4.4 Diseño experimental

Se utiliza el diseño de bloques completos al azar en arreglo Alfa-Latice con tres repeticiones. De acuerdo al siguiente el modelo matemático:

$$Y_{ijkl} = \mu + Loc_i + Rep_j(Loc_i) + Bloc_k(Loc_i*Rep_j) + Gen_l + Loc_i*Gen_l + \epsilon_{ijkl}$$

Donde:

**Y**= valor del carácter estudiado

**$\mu$** = media general

**Loc<sub>i</sub>**= efecto localidad

**Rep<sub>j</sub>(Loc<sub>i</sub>)**= efecto de la repetición anidado a la localidad

**Bloc<sub>k</sub> (Loc<sub>i</sub>\*Rep<sub>j</sub>)** = efecto del bloc anidado a la interacción localidad\*repetición

**Gen<sub>l</sub>**= efecto del genotipo

**Loc<sub>i</sub>\*Gen<sub>l</sub>**= efecto interacción genotipo\*localidad

$\epsilon_{ijkl}$ = error residual.

Los tratamientos fueron distribuidos mediante sorteo aleatorio dentro de cada bloque para garantizar independencia y evitar sesgos en la posición (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Sorteo o distribución aleatoria de los genotipos de arroz biofortificados (GAB).**

Trat	Tratamiento
1	GAB70-18
2	GAB16-18
3	GAB76-18
4	GAB37-18
5	GAB88-18
6	GAB71-18
7	IDIAP GAB-11
8	GAB13-18
9	IR-64
10	GAB69-18
11	GAB34-18
12	GAB18-18

#### 4.5 Variables de respuestas

En el Cuadro 4 se presentan variables de respuesta empleadas en la evaluación de genotipos de arroz biofortificado. Las características agronómicas y la reacción a enfermedades se determinaron con base en el Sistema de Evaluación Estándar para Arroz (Rosero, 1983). Los parámetros de calidad de grano se evaluaron según los criterios establecidos por el Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT] (1983). Los análisis de nutrientes en suelo y en granos se realizaron siguiendo las metodologías descritas por Villarreal y Name (1996) en el Manual técnico de técnicas analíticas del laboratorio de suelos del IDIAP. En las muestras de suelo se

determinaron el pH y la conductividad eléctrica en suspensión suelo:agua (1:2,5); la materia orgánica mediante oxidación sulfocrómica según el método de Walkley y Black; el fósforo disponible por el método Mehlich-1 con lectura colorimétrica (azul de molibdeno); los cationes intercambiables (K, Ca y Mg) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn) mediante extracción Mehlich-1 y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica; y el aluminio intercambiable con KCl 1 M, a partir de lo cual se calcularon la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) y la saturación de bases. En los granos, los análisis se efectuaron después de secado y molienda fina (malla 1 mm); el nitrógeno total se determinó por el método Kjeldahl, el fósforo por colorimetría tras digestión ácida y los elementos K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y Mn por espectrofotometría de absorción atómica, conforme a las técnicas establecidas por el IDIAP (Villarreal & Name, 1996).

**Cuadro 4. variables de respuesta empleadas en la evaluación de genotipos de arroz biofortificado.**

<b>Características Agronómicas</b>		<b>Reacción a Enfermedades (0-9)</b>	
<i>Sistema de evaluación estándar para arroz</i>			
Número de plantas por m <sup>2</sup>	Pta/m <sup>2</sup>	Piricularia al follaje	BI
Vigor	Vg	Piricularia al cuello	NBI
Altura de planta	Ht	Helminthosporium	BS
Resistencia al acame	Ldg	Hoja blanca	HB
Días a floración	Fl	Escaldado	LSc
Días a maduración	Mat	Manchado del grano	GID
Número de panículas por m <sup>2</sup>	Pac/m <sup>2</sup>	Rhizoctonia	ShB
Rendimiento de grano (14%)	kg·ha <sup>-1</sup>	Mancha ojival por Dreshlera	MO
Peso de panículas por m <sup>2</sup>	Pe/m <sup>2</sup>	Cercosporiosis	NBLS
		Sarocladium	ShR
		Falso carbón	FSM
		Bacteriosis	BB
<b>Calidad de Grano</b>			
Rendimiento total (%)	RT	Centro Blanco (0-5)	CB
Granos enteros (%)	GE	Digestión alcalina (1-7)	DA
Granos Quebrados (%)	GQ		

<b>Concentración de micronutrientes en grano y suelo</b>			
Hierro (mg·l <sup>-1</sup> )	Fe	Cobre (mg·l <sup>-1</sup> )	Cu
Zinc (mg·l <sup>-1</sup> )	Zn	Manganeso (mg·l <sup>-1</sup> )	Mn

**Fuente:**(Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT], 1983)

#### **4.6 Características de los suelos**

En la Cuadro 5, se presentan las características edáficas de las localidades donde se llevó a cabo el estudio, observándose similitudes con los suelos de zonas arroceras típicas de Panamá. En cuanto a la acidez, se registraron valores de pH muy bajos en Remedios (4,8) y La Trinchera (4,9), lo que indica una acidez elevada, mientras que en El Cacao (6,1), Martina (5,6) y Guarumal (5,4) los suelos mostraron una acidez moderada. Respecto a la textura, se encontraron diversas clases: suelos franco-arenosos en El Cacao y Barú; franco-arcillosos en Guarumal; arcillosos en La Trinchera; y francos en Remedios.

En cuanto al contenido de macro y micronutrientes, El Cacao, Barú y Guarumal presentaron niveles medios de fósforo, mientras que Remedios, La Trinchera y La Martina mostraron niveles muy bajos. El potasio se encontró en niveles medios en la mayoría de las localidades, excepto en Barú, donde se registró un contenido alto. En cuanto al aluminio, la mayoría de las localidades presentaron bajos niveles, a excepción de Remedios y La Trinchera, donde se detectaron concentraciones elevadas. La materia orgánica fue baja en todas las localidades evaluadas. Por último, los niveles de hierro fueron medios en la mayoría de los sitios, con valores altos en Remedios y La Martina; el contenido de zinc fue relativamente bajo en todas las localidades.

## Cuadro 5. Características Físicas Químicas del suelo de las diferentes localidades.

Localidad	Color suelo	A.L.Arc.	ph	p	K	Ca	Mg	Al	Mo	Mn	Fe	Zn	Cu	T.S
El Cacao	Pardo amarillo	42-42-16	6,1	37,0	146,8	18,1	6,4	0,2	2,1	108,1	54,1	3,4	4,9	FA
Barú	Pardo oscuro	A. 46-30-24	5,4	20	216	7,6	1,6	0,1	4,8	29	34	6	13	FA
Guarumal	Pardo amarillo	46-30-24	5,4	20	122	3,8	3,0	0,1	4,42	36	82	4	6	FARA
Remedios	P.A.C	46-30-24	4,8	2	47	1,7	0,6	1,5	4,02	257	219	5	9	F
Trinchera	P. Fuerte	46-16-38	4,9	3	78	4,2	1,6	1,7	3,22	28	77	2	6	ARCA
Martina	P.Parduzco	52-24-24	5,6	6	67	18,4	2,3	0,1	1,61	28	113	8	6	FARA

Nota: Criterios para la evaluación

pH: muy ácido <5,1; ácido 5,2 -5,9; poco ácido 6,0 a 6,9. P: bajo <18; medio 19-14; alto >55. K: bajo <44; medio 45-150; alto >151. Ca: bajo <2,0; medio 2,1-5,0; alto >5,1; Mg bajo <0,06; medio 0,7-1,5; alto > 1,6. Al: bajo <0,05; 06-1; alto >1,1. Mo: bajo <2,0; medio 2,1-6,0; alto >6,1; Mn: bajo <14, medio 14,1 a 49; alto >49,1. Fe: bajo <25,0; medio 25,1-75; alto >75; Zn bajo <4,0; medio 4,1 a 14; alto >14,1. Cu; bajo <2,0; medio 2,1- 6,0; alto >6,1.

### 4.7 Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de varianza por localidad y combinado a través de localidades, considerando un modelo mixto (ambiente aleatorio y genotipo fijo). Para la comparación de genotipos se utilizó el análisis de separación de medias, a través de las diferencias mínimas significativas (DMS =  $P < 0,05$ ).

Para el análisis de estabilidad se aplicó el modelo Biplot GGE  $S_{REG}$ , para un mejor entendimiento de la interacción G x A, respecto a la variable rendimiento de grano, el cual integra el análisis de varianza, análisis de regresión y el análisis de componentes principales. Además, se estimaron las repetitividads de las variables de acuerdo con (Gordón y Camargo 2015; Camargo et al. 2017).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza realizado para las variables agronómicas y fitosanitarias en líneas avanzadas de arroz biofortificado en condiciones de secano (Cuadro 6), mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos en variables clave como vigor, altura de planta, días a floración, días a maduración, piricularia al follaje, Helminthosporium, Sarocladium, manchado de grano, y rendimiento, lo que evidencia una importante variabilidad genética entre las líneas. Esta variabilidad es fundamental para el mejoramiento genético, ya que proporciona la base para seleccionar genotipos superiores (Singh & Verma, 2018). Además, la interacción Localidad × Tratamiento fue significativa en variables como vigor, floración, piricularia al follaje, Helminthosporium, manchado de grano y rendimiento, indicando que el comportamiento de los genotipos depende del ambiente, lo cual coincide con estudios previos que señalan la importancia de evaluar la estabilidad y adaptabilidad en diferentes ambientes para identificar materiales consistentes (Yan & Tinker, 2006). Las repetitividades ( $h^2$ ) fueron altas en la mayoría de las variables, destacando días a maduración (0,99), floración (0,98), altura de planta (0,98), manchado de grano (0,96) y rendimiento (0,92) lo que sugiere que la variación es mayormente genética, lo que favorece la eficiencia de los programas de selección (Falconer, 1996). Los valores de los coeficientes de variación estuvieron dentro de rangos aceptables, siendo bajos en

días a maduración (1,7%), floración (5,2%), y vigor (14,1%), lo que indica buena precisión experimental.

**Cuadro 6. Análisis de varianza (cuadrados medios) de variables agronómicas y fitosanitarias en arroz.**

FV	gl	pt/m	Vg	Ldg	Ht	Fl	Mat	BI	NBI	LSc	BS	ShB	Hb	ShR	GID	FSm	MO	NBLS	BB	tha
Modelo	119	69240	1,06	0,12	225	91,5	56,3	1,1	1,4	4,5	4,5	4,1	0,04	3,5	9,5	0,7	1,1	0,5	0,9	1,4
Loc	5	1541997 <sup>**</sup>	19,98 <sup>**</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	3190 <sup>ns</sup>	1136,3 <sup>**</sup>	599,4 <sup>**</sup>	18,7 <sup>**</sup>	19,5 <sup>**</sup>	85,2 <sup>**</sup>	70,1 <sup>**</sup>	60,0 <sup>**</sup>	0,12 <sup>**</sup>	44,4 <sup>**</sup>	156,2 <sup>**</sup>	7,1 <sup>**</sup>	19,7 <sup>**</sup>	6,7 <sup>**</sup>	9,9 <sup>**</sup>	22,7 <sup>**</sup>
Rep(Loc)	12	8956	0,33	0,16	79	73,1	28	0,5	0,5	1,9	1,2	3,0	0,01	0,9	0,5	0,4	0,0	1,4	1,9	0,7
BlocK(Rep*Loc)	36	5294	0,21	0,12	103	23,2	21,7	0,2	0,4	0,5	2,7	1,0	0,04	1,1	2,4	0,6	0,2	0,2	0,4	0,3
Trat	11	7169 <sup>ns</sup>	0,41 <sup>**</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	409 <sup>**</sup>	201,1 <sup>**</sup>	158,8 <sup>**</sup>	0,4 <sup>**</sup>	1,1 <sup>**</sup>	1,4 <sup>**</sup>	1,4 <sup>**</sup>	3,0 <sup>**</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	3,8 <sup>**</sup>	11,1 <sup>**</sup>	0,3 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>**</sup>	0,1 <sup>ns</sup>	0,5 <sup>**</sup>	1,0 <sup>**</sup>
Loc*Trat	55	8172 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>*</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	30 <sup>ns</sup>	19,8 <sup>ns</sup>	11,4 <sup>**</sup>	0,2 <sup>**</sup>	0,6 <sup>**</sup>	0,9 <sup>**</sup>	1,0 <sup>**</sup>	1,5 <sup>**</sup>	0,04 <sup>**</sup>	1,9 <sup>**</sup>	2,5 <sup>**</sup>	0,3 <sup>**</sup>	0,4 <sup>**</sup>	0,1 <sup>ns</sup>	0,3 <sup>**</sup>	0,4 <sup>**</sup>
Error	96	6799	0,12	0,15	43	19,0	3,9	0,1	0,4	0,5	0,4	0,8	0,02	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Total	215																			
	CV%	23,8	14,1	36,7	6,9	5,2	1,7	24,4	30,5	25,9	20,7	35,0	14,2	27,8	14,5	24,3	30,3	24,7	21,3	15,0
	h <sup>2</sup>	0,8	0,91	0,86	0,98	0,98	0,99	0,88	0,9	0,89	0,89	0,91	0,79	0,92	0,96	0,84	0,85	0,81	0,9	0,92

FV=fuente de variación; gl=grados de libertad; Pt/m=Número de plantas por metro cuadrado; Vg=vigor; Ldg=resistencia al acame; Ht=altura de planta; Fl=días a floración; Mat=días a maduración; BI=piricularia al follaje; NBI=piricularia al cuello; LSc=escaldado; BS=Helminthosporium; ShB=Rhizoctonia; hb=hoja blanca; ShR=Sarocladium; GID=manchado de grano; FSm=falso carbón; MO=mancha ojival por Dreshlera; NBLS=Cercosporiosis; BB=bacteriosis; tha<sup>-1</sup>=rendimiento (toneladas por hectárea). Nivel de significancia: \*\* = p<0.01; \* = p<0,05; ns = diferencias no significativas. CV%=coeficiente de variación; h<sup>2</sup>=heredabilidad.

Los resultados que se presentan en la Cuadro 7, confirman una amplia variabilidad fenotípica entre genotipos, tanto en aspectos morfoagronómicos como en sanidad vegetal y calidad nutricional. Los tratamientos IDIAP-GAB-11, GAB13-18, IR64 y GAB69-18 mostraron los mayores rendimientos de grano, superando el promedio general de 3,1 tha<sup>-1</sup>, lo que los posiciona como candidatos promisorios para zonas de alta productividad. No obstante, algunos de ellos, como el testigo IR64 y GAB69-18, presentaron también mayor susceptibilidad a enfermedades importantes como piricularia al cuello y bacteriosis, lo que podría limitar su estabilidad en ambientes con alta presión sanitaria. En contraste, tratamientos como GAB71-18 y GAB70-18 lograron un rendimiento aceptable, pero con mejor resistencia múltiple a

enfermedades, lo que los convierte en materiales estratégicos para entornos adversos o de baja intervención tecnológica. Esta diversidad de respuestas es común en materiales avanzados y resalta la importancia de integrar criterios múltiples en la toma de decisiones de selección (Ceccarelli, 1994; Fischer et al., 2014).

Adicionalmente, se observó variabilidad en los contenidos de micronutrientes, siendo los tratamientos GAB71-18 (20,85 ppm Zn) y GAB76-18 (2,00 ppm Fe) los que destacaron por su mayor concentración de zinc y hierro, respectivamente. Estas diferencias nutricionales son de gran relevancia en el contexto de biofortificación, ya que permiten seleccionar genotipos no solo por su desempeño agronómico, sino también por su contribución al mejoramiento de la calidad alimentaria (Bouis & Saltzman, 2017). De acuerdo con los valores de referencia establecidos por el programa HarvestPlus y otras instituciones como el CIAT y el IRRI, para que un material de arroz pulido sea considerado biofortificado debe alcanzar al menos 24 ppm de zinc y 13 ppm de hierro en base seca (Pfeiffer & McClafferty, 2007; HarvestPlus, 2020). Si bien los niveles observados en este estudio no alcanzan dichos umbrales, la variabilidad genética identificada constituye un punto de partida valioso para futuros procesos de mejoramiento y selección.

**Cuadro 7. Valores medios de las variables agronómicas y reacción a enfermedades y características nutricionales de los cultivares evaluados, según número de tratamiento.**

Tratamiento	pt/m	Vg	Ldg	Ht	Fl	Mat	BI	NBI	LSc	BS	ShB	Hb	SHr	GID	FSm	MO	NBLS	BB	tha	Fe	Zn
GAB-11	313	2,3	1,3	105	90	121	1,4	1,5	2,4	2,4	1,8	1,1	2,2	4,3	1,7	1,1	1,1	2,0	3,5	0,7	17,8
GB13-18	310	2,4	1,0	93	85	117	1,3	2,0	2,5	2,6	2,0	1,1	2,7	3,5	1,4	1,1	1,1	1,7	3,4	0,4	19,6
IR64	371	2,5	1,0	89	78	111	1,6	2,2	3,1	3,0	3,2	1,0	3,6	6,2	1,9	1,6	1,1	2,0	3,2	0,7	19,9
GB69-18	372	2,3	1,0	96	85	116	1,7	2,0	2,7	3,5	2,6	1,1	2,5	3,3	1,6	1,5	1,2	2,0	3,2	0,8	19,7
GB18-18	317	2,8	1,1	85	88	120	1,7	2,4	2,6	2,9	3,2	1,0	3,3	3,3	1,6	1,4	1,0	1,8	3,1	1,1	20,6
GB70-18	363	2,4	1,0	95	87	118	1,7	1,8	2,8	3,3	2,4	1,0	2,3	3,9	1,7	1,2	1,2	1,7	3,1	1,0	18,3
GB16-18	348	2,6	1,2	98	86	118	1,6	2,0	2,3	3,1	1,9	1,1	2,7	4,8	1,7	1,3	1,2	1,9	3,1	1,9	19,9
GB71-18	361	2,3	1,0	101	85	117	1,3	1,9	2,6	2,8	2,8	1,0	2,6	4,4	1,9	1,3	1,2	2,1	3,1	0,6	20,9
GB37-18	366	2,4	1,0	90	79	111	1,4	2,1	3,2	3,3	2,8	1,0	3,1	5,4	1,9	1,3	1,2	2,1	3,0	1,2	19,0
GB76-18	359	2,4	1,0	90	79	11	1,7	2,2	2,9	3,2	2,8	1,0	3,4	5,6	1,9	1,3	1,2	2,0	3,0	2,0	19,3
GB34-18	349	2,4	1,0	100	84	118	1,4	1,9	2,4	2,4	2,3	1,0	2,4	3,4	1,8	1,4	1,2	1,8	2,7	1,0	20,0
GB88-18	322	2,7	1,3	94	80	116	1,6	2,2	2,9	3,0	2,7	1,0	3,4	5,6	1,8	1,5	1,2	2,4	2,6	1,2	19,3
Promedio	346	2,5	1,1	95	84	116	1,5	2,0	2,7	3,0	2,5	1,0	2,8	4,4	1,7	1,3	1,2	2,0	3,1	1,0	19,5
DMS	60	0,2	0,3	4	3	1	0,2	0,4	0,5	0,4	0,6	0,1	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3		

Pt/m=Número de plantas por metro cuadrado; Vg=vigor; Ldg= resistencia al acame; Ht=altura de planta; Fl=días a floración; Mat=días a maduración; BI=piricularia al follaje; NBI=piricularia al cuello; LSc=escalado; BS=Helminthosporium; ShB=Rhizoctonia; HB=hoja blanca; ShR=Sarocladium; GID=manchado de grano; FSm=falso carbón; MO=mancha ojival por Dreshlera; NBLS=Cercosporiosis; BB=bacteriosis; tha<sup>-1</sup>=rendimiento (toneladas por hectárea). Fe y Zn: mg·kg<sup>-1</sup> (miligramos por kilogramo de grano seco).

El análisis Biplot GGE de componentes principales (Gráfica 1) permite visualizar la interacción genotipo × ambiente para el rendimiento de grano en arroz biofortificado, complementando los resultados de las Cuadros 6 y 7. En este gráfico, los genotipos (T1 a T12) se representan como puntos, mientras que las localidades aparecen como vectores que reflejan su capacidad de discriminación y representatividad. Los genotipos que conforman el polígono son aquellos que muestran mayor sensibilidad a los estímulos ambientales, destacando positivamente los que se ubican a la derecha del primer componente principal (CP-1), como T-7 (IDIAP-GAB-11) y T-8 (GAB13-18), identificados como los de mejor adaptabilidad. Por su parte, los genotipos T-6 (GAB71-18), T-9 (IR64) y T-10 (GAB69-18), al estar más próximos al eje central del segundo

podría estar asociado a una menor adaptabilidad o mayor susceptibilidad a factores bióticos o abióticos. Esta variabilidad observada es consistente con lo reportado por otros autores en ensayos con arroz biofortificado, donde el comportamiento diferencial entre genotipos ha sido clave para avanzar en la selección de líneas adaptadas a condiciones de secano (Bhullar & Gruissem, 2013).

La información proveniente del análisis de varianza tipo IV y el análisis de componentes principales (ACP) aplicado al rendimiento de grano (Cuadro 8) complementa los hallazgos previos al confirmar la influencia significativa de los factores localidad, genotipo y su interacción en la expresión del rendimiento, lo cual evidencia tanto la sensibilidad ambiental como la variabilidad genética entre los materiales. La significancia de la interacción refuerza la necesidad de identificar genotipos con estabilidad y adaptabilidad frente a distintos entornos, en concordancia con lo planteado por Crossa et al. (2002), quienes destacan la utilidad de modelos multivariados para seleccionar genotipos con desempeño predecible bajo condiciones variables. Además, los dos primeros componentes principales (PCA-1 y PCA-2) explicaron conjuntamente el 64,8 % de la variación total (42,4 % y 22,6 %, respectivamente), lo que indica que gran parte de la variabilidad del rendimiento puede representarse eficazmente en un espacio bidimensional, facilitando la diferenciación y agrupación de los genotipos según su comportamiento. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de selección varietal por su capacidad para simplificar datos complejos sin pérdida significativa de información (Yan & Rajcan, 2002). El error residual del 35 % se encuentra dentro de rangos aceptables para este

tipo de análisis multivariado, lo que respalda la confiabilidad de los patrones identificados.

**Cuadro 8. Análisis de varianza tipo IV y componentes principales (PCA) para la variable rendimiento de granos.**

<b>F de V</b>	<b>g.l.</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr&gt;F</b>	<b>%</b>
<b>LOC</b>	5	112,56	22,56	107,44	**	
<b>GEN</b>	11	14,25	1,3	6,17	**	
<b>LOC*GEN</b>	55	25,39	0,46	2,2	**	
<b>PCA-1</b>	15	16,8	1,12	5,33	**	42,4
<b>PCA-2</b>	13	8,97	0,69	3,28	**	22,6
<b>Residual</b>	32	13,87	1,52			35

\*Diferencia significativa ( $P < 0,05$ ). \*\*Diferencia altamente significativa ( $P < 0,01$ )

En este sentido, el análisis combinado de variables agronómicas y fitosanitarias por localidad, presentado en la Cuadro 9, refuerza esta interpretación al evidenciar contrastes marcados entre ambientes. Por ejemplo, Remedios mostró el mayor rendimiento promedio ( $4,1 \text{ tha}^{-1}$ ), asociado a una menor densidad de plantas ( $149 \text{ pt/m}^2$ ) y moderada incidencia de enfermedades como manchado de grano y bacteriosis, mientras que Tonosí, con un rendimiento menor ( $2,9 \text{ t ha}^{-1}$ ), presentó mayor severidad de piricularia y Rhizoctonia, lo que valida su carácter ambientalmente restrictivo.

**Cuadro 9. Valores medios de las variables agronómicas y reacción a enfermedades por localidad.**

Localidad	pt/m	Vg	Ldg	Ht	FI	Mat	BI	NBI	LSc	BS	ShB	Hb	GID	FSm	MO	NBLS	BB	tha <sup>-1</sup>
Remedios	149	3,0	1,1	96	79	116	1,3	1,8	2,7	2,5	3,1	1,0	2,8	1,5	1,0	1,0	2,0	4,1
Barú	179	2,6	1,1	101	83	118	2,7	3,1	3,9	4,2	3,4	1,0	3,9	2,3	2,8	2,1	2,4	3,8
Guarumal	553	1,0	1,2	95	78	112	1,0	1,3	1,0	1,0	1,2	1,0	7,5	1,8	1,0	1,0	1,0	3,3
Tonosí	267	2,8	1,0	102	92	122	2,1	2,7	1,5	2,9	4,3	1,1	3,5	1,0	1,1	1,0	1,8	2,9
La Martina		3,0	1,0	97			1,0	1,9	5,1	4,9	1,1	1,0	2,2	1,8	1,0	1,0	2,0	2,5
Trinchera	582	2,3	1,0	76	86	113	1,0	1,3	2,1	2,3	2,1	1,1	6,4	2,1	1,0	1,0	2,5	2,0
Promedio	346	2,5	1,1	95	84	116	1,5	2,0	2,7	3,0	2,5	1,0	4,4	1,7	1,3	1,2	2,0	3,1
DMS	39	0,2	0,2	3	2	1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2

Pt/m=Número de plantas por metro cuadrado; Vg=vigor; Ldg= resistencia al acame; Ht=altura de planta; FI=días a floración; Mat=días a maduración; BI=piricularia al follaje; NBI=piricularia al cuello; LSc=escaldado; BS=Helminthosporium; ShB=Rhizoctonia; hb=hoja blanca; ShR=Sarocladium; GID=manchado de grano; FSm=falso carbón; MO=mancha ojival por Dreshlera; NBLS=Cercosporiosis; BB=bacteriosis; tha<sup>-1</sup>=rendimiento

Esta heterogeneidad entre sitios destaca la importancia de considerar la interacción genotipo × ambiente y de seleccionar materiales no solo por rendimiento, sino también por estabilidad y tolerancia sanitaria, tal como señalan (Ceccarelli, 1994; Yan & Kang, 2003; Fischer et al., 2014) en sus recomendaciones para mejoramiento en ambientes marginales.

La Gráfica 3, confirma estadísticamente los contrastes previamente observados en la Cuadro 9. Se evidencian diferencias significativas entre localidades, clasificadas en seis grupos estadísticos (a–f), lo que refuerza el impacto del ambiente sobre el comportamiento productivo de los genotipos. Remedios mostró el rendimiento más alto y se ubicó en la categoría “a”, lo que indica que fue estadísticamente superior al resto de las localidades. Le siguen Barú (b) y Guarumal (c), que también presentaron rendimientos por encima del promedio general. En cambio, Trinchera, con un rendimiento inferior a 2.5 tha<sup>-1</sup>, fue clasificada en el grupo “f”, siendo la localidad menos favorable para el rendimiento.

agricultor como para la agroindustria. De acuerdo con los estándares establecidos en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT No. 75-2002, un arroz clasificado como de calidad “especial” debe contener al menos 94,5 % de granos enteros, no más del 5 % de granos quebrados y un máximo de 0,5 % de arrocillo, además de bajos niveles de defectos como granos tiza, amarillos o manchados (Ministerio de Comercio e Industrias [MICI], 2002). En este contexto, los genotipos que se acercan o superan estos parámetros adquieren un mayor potencial para su comercialización y exportación. En contraste, genotipos como GAB16-16 y GAB-69-18, si bien mostraron rendimientos totales aceptables, presentaron porcentajes más elevados de granos partidos o manchados, lo que podría afectar su valor comercial final, al no cumplir con los requisitos exigidos por la normativa nacional para las categorías superiores de calidad de arroz pilado.

**Cuadro 10. Rendimiento total y otras características industriales de los cultivares evaluados en 6 Localidades.**

<b>Genotipo</b>	<b>Rendimiento total</b>	<b>Grano Entero</b>	<b>Grano quebrado</b>	<b>Arrocillo</b>	<b>Centro blanco</b>	<b>Grano tiza</b>
IR64	70,44	62,74	5,72	1,98	3	6
GAB88-18	70,01	65,39	3,03	1,59	3	6
GAB69-19	69,53	55,53	10,1	3,9	4	4
I-GAB-11	69,52	65,12	2,64	1,76	1,4	2
GAB18-18	69,1	61,3	5,3	2,5	3	6
GAB76-18	68,48	60,53	4,58	3,37	2	4
GAB71-18	67,88	63,82	2,47	1,59	1,6	4
GAB70-18	67,19	58,85	5,1	3,34	1,2	1
GAB13-18	66,46	59,23	4,21	3,02	1,2	2
GAB37-18	66,39	62,59	2,77	1,03	1,6	4
GAB16-18	65,91	61,23	11,75	2,94	3	10
GAB34-18	64,85	55,91	5,11	3,83	1,8	6
<b>promedio</b>	<b>67,99</b>	<b>60,19</b>	<b>5,23</b>	<b>2,57</b>	<b>2,23</b>	<b>4,58</b>
<b>DesvEst.</b>	<b>1,73</b>	<b>4,09</b>	<b>2,79</b>	<b>0,92</b>	<b>0,88</b>	<b>2,33</b>

Estas diferencias en la calidad industrial del grano son especialmente relevantes en el contexto del arroz biofortificado, donde se busca no solo mejorar el contenido nutricional, sino también asegurar que las variedades cumplan con requisitos de procesamiento y consumo exigidos por el mercado (Rajendran et al., 2021). La calidad del grano es un criterio esencial para la aceptación de nuevas variedades en cadenas de valor, y debe evaluarse junto con rendimiento, sanidad y valor nutricional.

## 6. CONCLUSIONES

1. Las líneas avanzadas evaluadas mostraron diferencias estadísticamente significativas en variables agronómicas, fitosanitarias y de calidad nutricional, lo cual es esencial para la selección de materiales promisorios.
2. Las líneas GAB13-18 y GAB88-18 demostraron alto rendimiento y buena estabilidad en múltiples ambientes, destacándose como candidatos para su posible liberación en las áreas rurales de pobreza y pobreza extrema.
3. La interacción genotipo  $\times$  ambiente fue determinante en la expresión del rendimiento, validando la necesidad de pruebas multilocales para asegurar una selección efectiva y contextualizada.
4. Genotipos como GAB71-18 y GAB76-18 presentaron concentraciones elevadas de zinc y hierro, respectivamente, lo que refuerza su contribución al combate de la desnutrición en zonas rurales.
5. Algunos genotipos destacaron por sus características molineras e industriales, con altos porcentajes de grano entero y baja incidencia de defectos.

## 7. RECOMENDACIONES

1. Validar a mayor escala los genotipos promisorios en ciclos agrícolas posteriores y bajo condiciones de manejo de pequeños productores.
2. Promover su adopción mediante programas de extensión agrícola que capaciten a agricultores sobre el manejo de arroz biofortificado.
3. Fortalecer la articulación entre investigadores, extensionistas y agricultores del sistema familiar para garantizar la cadena de valor del arroz biofortificado.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Alianza de Bioersity International & CIAT.** (2021). *Fedearroz BIOZn035: Primera variedad de arroz biofortificado con zinc para Colombia*. <https://alliancebioersityciat.org/es/stories/fedearrozbiozn035-primera-variedad-de-arroz-biofortificado-con-zinc-para-colombia>
- Becker, H. C.** (1981). Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica*, 30, 835–840. <https://doi.org/10.1007/BF00038812>
- Bhullar, N. K., & Gruissem, W.** (2013). Nutritional enhancement of rice for human health: The contribution of biotechnology. *Biotechnology Advances*, 31(1), 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.001>
- Blanco Fuentes, R.** (2017). *Genética de la resistencia de las plantas a factores bióticos: Un informe* [Informe técnico]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16383.10400>
- Bouis, H. E., & Saltzman, A.** (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003–2016. *Global Food Security*, 12, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>
- Camargo, I., Quirós Mc, E., & Zachrisson, B.** (2014). *Innovación tecnológica para el manejo integrado del cultivo de arroz en Panamá* [Informe técnico]. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá.

<https://www.researchgate.net/.../INNOVACION-TECNOLOGICA-PARA-EL-MANEJO-INTEGRADO-DEL-CULTIVO-DE-ARROZ-EN-PANAMA.pdf>

**Camargo-Buitrago, I., Gordón-Mendoza, R. & Quirós-McIntire E.I.** (2017). La repetitividad como estimador de la precisión experimental en el análisis de experimentos. *Agronomía Mesoamericana* 28(1),159-169. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v28i1.24239>.

**Ceccarelli, S.** (1994). Specific adaptation and breeding for marginal conditions. *Euphytica*, 77, 205–219. <https://doi.org/10.1007/BF02262633>

**Cedeño, M., González, H., & Aparicio, H.** (2017). *Guía técnica para la producción de arroz biofortificado en Panamá*. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) & Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA).

**Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).** (1983). *Sistema de evaluación estándar para arroz*. Cooperación IRRI–CIAT. <https://cgspace.cgiar.org/.../90822293-f0cb-4f15-a871-e160a5d2ca3f/content>

**CGIAR Research Program on Agriculture for Nutrition and Health.** (2019). *CIAT BIO-44 + Zinc: A new biofortified zinc rice variety released in Bolivia*. En *Agriculture for Nutrition & Health Annual Report 2019: Innovations*. <https://hdl.handle.net/10568/123331>

**Crossa, J., Cornelius, P. L., & Yan, W.** (2002). Erratum: Biplots of linear–bilinear models for studying crossover genotype × environment interaction (*Crop Science*, 42(3), 619–633). *Crop Science*, 42, 619–633. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.6190>

**Falconer, D. S.** (1996). *Introduction to quantitative genetics* (3.<sup>a</sup> ed.). Pearson Education India.

<https://vulms.vu.edu.pk/.../Introduction%20to%20Quantitative%20Genetic-DS%20Falconer.pdf>

**Food and Agriculture Organization [FAO].** (2022). *Rice market monitor*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

<https://www.fao.org/economic/RMM/>

**Food and Agriculture Organization [FAO].** (2023). *Food Outlook: Biannual Report on Global Food Markets (June 2023)*. Food and Agriculture Organization of the

United Nations. <https://openknowledge.fao.org/.../ecccc486-24c6-4541-9e3e-46dfebd48c4b>

**Fischer, R. A., Byerlee, D., & Edmeades, G.** (2014). Crop yields and global food security. In *Proceedings of the ACIAR Conference* (pp. 8–11). Canberra, ACT:

ACIAR. <https://www.researchgate.net/.../Byerlee>

**GAIN.** (2022). *Global database on the implementation of nutrition actions (GINA)*.

<https://www.gainhealth.org>

**Gauch, H. G., Piepho, H., & Annicchiarico, P.** (2008). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Science*, 48(3), 866–889.

<https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0513>

**Gauch Jr., H. G.** (2013). A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop*

*Science*, 53(5), 1860–1869. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0241>

**Gordon, R., & Camargo, I.** (2012). *Alternativas para la producción de arroz y maíz con alto valor nutricional (cultivos biofortificados)* [Informe técnico]. IDIAP. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13294.72008>

**Gordón-Mendoza, R. & Camargo-Buitrago I.** (2015b). Selección de estadísticos para la estimación de la precisión experimental en ensayos de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 26(1),55-63. <https://doi.org/10.15517/am.v26i1.16920>

**Gross, B. L., & Zhao, Z.** (2014). Archaeological and genetic insights into the origins of domesticated rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6190–6197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308942110>

**HarvestPlus.** (2020). *HarvestPlus biofortified crops map and table updated with 2020 data*. HarvestPlus. <https://www.harvestplus.org/.../harvestplus-biofortified-crops-map-and-table-updated-with-2020-data/>

**Herrera-Córdoba, J. J., & Castro López, R. A.** (2011). Evaluación de 10 líneas de arroz (*Oryza sativa* L.) biofortificadas con hierro y zinc... [Informe]. Repositorio UNAN. <https://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/7045/>

**Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá [IDIAP].** (2020). *Producción de cultivos biofortificados y su uso en la alimentación humana: AgroNutre Panamá* [Proyecto]. <https://proyectos.idiap.gob.pa/.../cultivos-biofortificados-agronutre-panama/es>

**Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC].** (2023). *Consumo per cápita de alimentos en Panamá*. Instituto Nacional de Estadística y Censo. <https://www.inec.gob.pa>

**Instituto Nacional de Estadística y Censo INEC.** (2024). *Hoja de balance de alimentos: Años 2020–21*. Instituto Nacional de Estadística y Censo. [https://www.inec.gob.pa/...ID\\_PUBLICACION=1263](https://www.inec.gob.pa/...ID_PUBLICACION=1263)

**International Rice Research Institute [IRRI].** (2007). *The rice plant: Morphology, environment and breeding* [Módulo educativo]. International Rice Research Institute. [http://www.knowledgebank.irri.org/.../Module\\_0.htm](http://www.knowledgebank.irri.org/.../Module_0.htm)

**Juliano, B. O.** (1993). *Rice in human nutrition* (FAO Plant Production and Protection Paper No. 26). International Rice Research Institute & FAO. <https://www.fao.org/3/t0567e/t0567e00.htm>

**Ministerio de Comercio e Industrias [MICI].** (2002). *Reglamento técnico DGNTI COPANIT 75: Granos y cereales — Arroz pilado* (Gaceta Oficial No. 24 664, 20 de noviembre de 2002). [https://www.gacetaoficial.gob.pa/.../24684\\_2002.pdf](https://www.gacetaoficial.gob.pa/.../24684_2002.pdf)

**Ministerio de Desarrollo Agropecuario [MIDA].** (2024). *Siembra y cosecha de arroz del año agrícola 2023–2024 llega al 91.11%*. Agencia de Noticias de Panamá. [https://www.mida.gob.pa/...ID\\_PUBLICACION=1263](https://www.mida.gob.pa/...ID_PUBLICACION=1263)

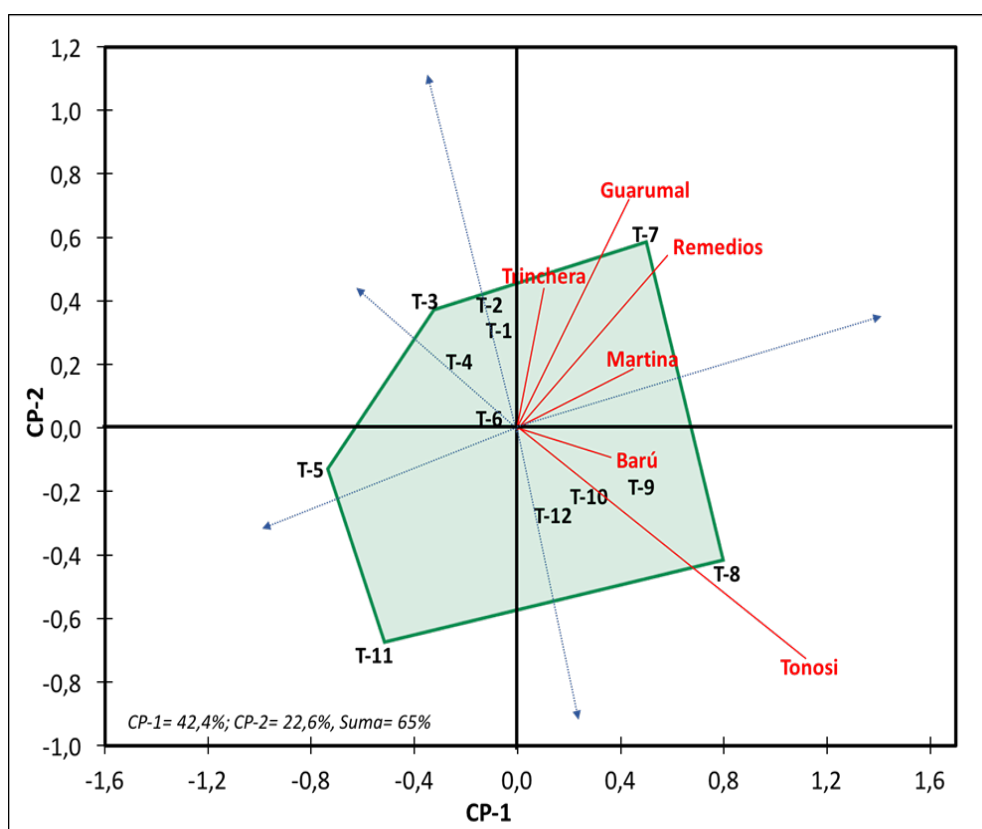
**Panamá América.** (2023, 27 de octubre). Arroz, maíz y frijoles son los más estudiados en mejora genética. *Panamá América*. <https://www.panamaamerica.com.pa/...>

**Pfeiffer, W. H., & McClafferty, B.** (2007). Biofortification: Breeding micronutrient-dense crops. En *Breeding Major Food Staples* (pp. 61–91). <https://doi.org/10.1002/9780470376447>

- Rajendran, P., Velprabakaran, V., & Jeevanandham, N.** (2021). Breeding for grain quality improvement in rice (p.00) [Capítulo de libro]. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95001>
- Rosero, M.** (1983). *Sistema de evaluación estándar para arroz* [Informe técnico]. <https://cgspace.cgiar.org/.../9>
- Singh, N., & Verma, O. P.** (2018). Genetic variability, heritability and genetic advance in rice (*Oryza sativa* L.) under salt-stressed soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 3114–3117. <https://www.phytojournal.com/.../genetic-variability-heritability-and-genetic-advance-in-rice...>
- Trijatmiko, K. R., Dueñas, C., Tsakirpaloglou, N., Torrizo, L., Arines, F. M., Adeva, C., et al.** (2016). Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Scientific Reports*, 6, 19792. <https://www.nature.com/articles/srep19792>
- Villarreal, J., & Name, B.** (1996). *Técnicas analíticas del laboratorio de suelos del IDIAP* [Manual técnico]. IDIAP.
- World Food Programme (WFP).** (2016). *Promoting rice biofortification in Latin America and the Caribbean*. <https://www.wfp.org>
- World Health Organization (WHO).** (2020). *Micronutrient deficiencies*. [https://www.who.int/health-topics/micronutrients#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/micronutrients#tab=tab_1)
- Yan, W., Hunt, L. A., Sheng, Q., & Szlavnics, Z.** (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*, 40(3), 597–605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>

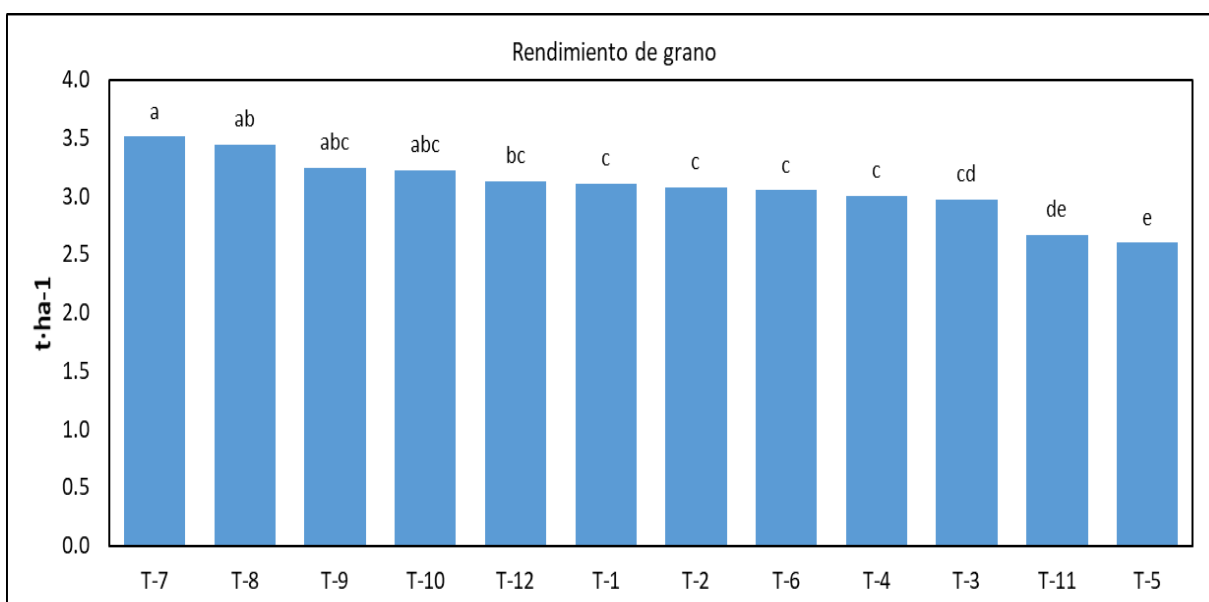
- Yan, W., & Rajcan, I.** (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*, 42(1), 11–20. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1100>
- Yan, W., & Tinker, N. A.** (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Crop Science*, 46(1), 8–17. <https://doi.org/10.4141/P05-169>
- Yan, W., & Kang, M. S.** (2003). *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CABI.
- Yang, Z.** (2022). Plant growth: A matter of WAK seeing the wall and talking to BRI1. *Current Biology*, 32(12), R564–R566. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.04.041>
- Yoshida, S.** (1981). *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute. <https://www.irri.org/.../fundamentals-of-rice-crop-science>

componente principal (CP-2), reflejan mayor estabilidad en su rendimiento. En cuanto a la interacción específica con los ambientes, T-9 (IR64) y T-10 (GAB69-18) mostraron alto rendimiento en Barú y Tonosí, mientras que T-1 (GAB70-18), T-2 (GAB16-18) y T-4 (GAB37-18) se desempeñaron mejor en Trinchera, lo que evidencia una adaptabilidad específica. T-6 (GAB71-18), ubicado cerca del origen del Biplot, evidenció un comportamiento estable, pero con rendimiento moderado en todos los ambientes. Cabe destacar que Tonosí, al encontrarse alejada del centro del gráfico, se posiciona como una localidad con alta capacidad discriminativa y comportamiento ambiental particular, siendo clave para la diferenciación entre genotipos.



**Gráfica 1. Biplot de Componentes Principales: Interacción Genotipo × Ambiente para los 12 tratamientos en las 6 localidades.**

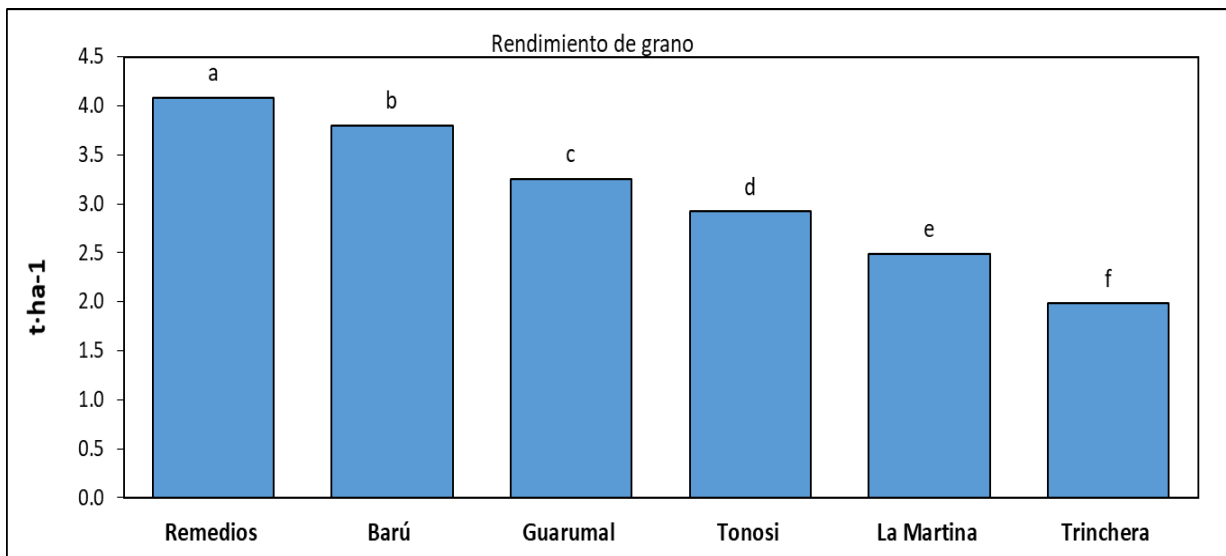
La separación de medias para la variable rendimiento (Gráfica 2), evidenció diferencias significativas entre los tratamientos, reforzando los resultados ya descritos en la Cuadro 7. El tratamiento 7 (IDIAP-GAB-11) alcanzó el rendimiento más alto y fue estadísticamente superior al grupo de tratamientos con menor desempeño, ubicándose solo en la categoría “a”. Le siguen 8 (GAB13-18), 9 (IR64) y 10 (GAB69-18), con rendimientos también altos y clasificados dentro del grupo “ab” o “abc”, lo que confirma su potencial productivo bajo las condiciones evaluadas.



Rendimiento de grano (t·ha<sup>-1</sup>) en diferentes tratamientos (T-1 a T-12). Las letras sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de comparación de medias de Diferencia Mínima Significativa (DMS) al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . Tratamientos que compartan al menos una letra no difieren significativamente entre sí.

**Gráfica 2. Rendimiento de grano y separación de medias en tratamientos evaluados.**

En contraste, tratamientos como 5 (GAB88-18) y 11 (GAB34-18), ubicados en las categorías “e” y “de” respectivamente, presentaron los rendimientos más bajos, lo cual



Rendimiento de grano ( $t \cdot ha^{-1}$ ) en diferentes localidades. Las letras sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de comparación de medias de Diferencia Mínima Significativa (DMS) al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . Localidades que comparten al menos una letra no difieren significativamente entre sí.

### Gráfica 3. Separación de medias por localidad para la variable rendimiento de grano.

Esta separación de medias nos permite establecer con claridad qué ambientes fueron más productivos, y sugiere que factores edafoclimáticos o la presión de enfermedades podrían estar limitando el rendimiento en sitios como Trinchera o La Martina.

Para complementar la caracterización agronómica y nutricional de los genotipos evaluados, se analizaron indicadores industriales relevantes para su adopción comercial (Cuadro 10). Se observaron diferencias marcadas entre genotipos en cuanto a estas características, lo cual refuerza la necesidad de un enfoque integral en la selección de materiales. Genotipos como IR64, GAB88-18, GAB69-18 y IDIAP-GAB-11 destacaron por tener altos rendimientos totales. Además, GAB88-18 e IDIAP-GAB-11 mostraron buenos valores industriales, como un alto porcentaje de grano entero y bajo nivel de grano quebrado, lo que los posiciona favorablemente tanto para el

## 9. ANEXOS

### ANEXO 1. Siembra del ensayo



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 2. Vista aérea del ensayo.



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

### ANEXO 3. Toma de datos.



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

#### ANEXO 4. Arreglo para la cosecha del ensayo



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 5. Cosecha del ensayo



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 6. Secado de muestras de arroz



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 7. Limpieza de muestras de arroz.



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 8. Aparato para medir la humedad del grano



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.

## ANEXO 9. Pesado de muestras de arroz



**Fuente:** Imágenes fotográficas tomadas por la investigadora Elis, desde el terreno donde se realizó el Ensayo en Tonosí.