



CRIA

Programa de consorcios de Investigación Agropecuaria



INFORME FINAL

**CRIA OCCIDENTE
CADENA DE FRIJOL**

**“Rendimiento y adaptabilidad de genotipos biofortificados de frijol arbustivo
(*Phaseolus vulgaris* L.), en el altiplano de Huehuetenango y San Marcos, 2017”**

Eduardo Rodrigo Fuentes Navarro
Investigador Principal

Eddy Ixcotoyac Cabrera
Investigador Asociado

Oscar Xutuc Castillo
Investigador. Asociado

Guatemala 25 de Octubre de 2019

Este proyecto fue ejecutado gracias al apoyo financiero del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). El contenido de ésta publicación es responsabilidad de su(s) autor(es) y de la institución(es) a las que pertenecen. La mención de empresas o productos comerciales no implica la aprobación o preferencia sobre otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Rendimiento y adaptabilidad de genotipos biofortificados de frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L.), en el altiplano de Huehuetenango y San Marcos, 2017

Eduardo Rodrigo Fuentes Navarro
Eddy Ixcotoyac Cabrera
Oscar Xutuc Castillo

Resumen

La investigación fue realizada en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos en el altiplano occidental de Guatemala durante el año 2018, con el objetivo de incrementar la producción de frijol arbustivo mediante el uso de genotipos rendidores de frijol arbustivo. Para la investigación se establecieron seis ensayos en fincas de agricultores, sembrados en diferentes fechas. Se utilizó un diseño de bloque al azar con tres repeticiones y 12 tratamientos, que incluyó diez genotipos de frijol biofortificados y dos variedades. Se encontró significancia entre la interacción genotipo ambiente, el modelo Regresión por Sitios identificó al menos un genotipo ganador para cada localidad. El modelo AMMI 1 determinó que los genotipos adaptados a todos los ambientes fueron L-72, L-117, L-129 y L-123, con rendimiento superior a la media de los ambientes. La respuesta de los genotipos a las enfermedades de roya y antracnosis no fue bien marcada, debido a las condiciones ambientales presentadas durante el ciclo de cultivo. Las concentraciones de hierro y zinc en los granos de los genotipos, no alcanzaron los límites establecidos para catalogarlos como biofortificados según lo propuesto por HarvestPlus. Los análisis realizados permite concluir que los genotipos L-72 y L-123, presentan rendimiento superiores y adaptabilidad a los ambientes, por lo que se espera continuar el proceso con la validación de la tecnología para una nueva variedad de frijol arbustivo.

Yield and adaptability of biofortified bush beans genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.), in the highlands of Huehuetenango and San Marcos, 2017

Eduardo Rodrigo Fuentes Navarro
Eddy Ixcotoyac Cabrera
Oscar Xutuc Castillo

Abstract

The research was conducted in the departments of Huehuetenango and San Marcos in the western highlands of Guatemala during 2018, with the target of increasing the bush bean production through the use bush bean genotypes with high yield potential. In this research, six trials were established on farmer farms, planted at different dates according to planting season in each location. A randomized block design (RCBD) with three replications and 12 treatments was used, which included 10 biofortified bush bean genotypes and two non-biofortified varieties used as controls. Significant difference ($P < 0.05$) was found between the genotype environment ($G \times E$) interaction, the Regression by Site model allowed to identify at least one superior genotype for each location. The AMMI 1 model determined that the genotypes adapted to all environments were L-72, L-117, L-129 and L-123, with performance above the mean yield of all locations. The response of genotypes to rust and anthracnose diseases was highly variable, due to the environmental conditions presented during the crop cycle. The iron and zinc concentrations in the grains of the genotypes did not reach the limits established to be classified as biofortified as proposed by HarvestPlus. The analyses allow us to conclude that genotypes L-72 and L-123 have qualities of high yield and adaptability to the environments, so it is expected to continue with technology validation for a new variety of bush beans.

Índice

1. Introducción	1
Planteamiento del problema	1
Justificación.....	2
2. Marco teórico.....	2
2.1. Rendimiento de variedades mejoradas de frijol.	2
2.2. Principales características de las variedades mejoradas	3
2.3. Característica de los genotipos biofortificados.....	3
2.4. Progreso de biofortificación en el cultivo de frijol común.....	4
2.5. Importancia de la biofortificación para la alimentación humana.....	5
2.6. Características de los genotipos biofortificados en evaluación	5
2.7. Evaluación de genotipos biofortificados en el área de occidente.	7
2.8. Interacción Genotipo x Ambiente (GE)	7
2.9. Adaptabilidad	7
3. Objetivos	8
4. Hipótesis	8
5. Metodología.....	9
5.1 Localidades y fechas de siembra.....	9
5.2 Diseño experimental.....	10
5.3 Tratamientos	10
5.4 Tamaño de la unidad experimental	11
5.5 Modelo estadístico	11
5.6. Variables de respuesta	12
5.7. Análisis de la información.....	14
5.8 Manejo del experimento.....	15
6. Resultados y discusión.....	17
6.1. Rendimiento	17
6.2. Genotipos adaptados para los ambientes evaluados	19
6.3. Modelo AMMI 1 (Additive Main effects and Multiplicative Interaction).....	21
6.4. Análisis de Componentes Principales de las variables en la investigación .	21
6.5. Análisis de Correspondencia (AC) para enfermedades	23
6.6. Contenido de Hierro (Fe) y Zinc (Zn), de los genotipos de frijol cultivados en condiciones de finca del agricultor.	26

7. Conclusiones.....	28
8. Recomendaciones	29
9. Referencias bibliográficas.....	29

1. Introducción

El cultivo de frijol para Guatemala es una fuente de proteínas de origen vegetal para la población. En el año agrícola 2013 - 2014, la producción de frijol fue de 4,966,700 quintales a nivel nacional, con rendimiento promedio de 14 quintales por manzana. Para ese período la producción de frijol en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos fue de 203,381 y 74,838 quintales, respectivamente. Sin embargo, esta producción no cubre la demanda de la población guatemalteca, para el año 2014 se importaron 2,557 toneladas métricas (MAGA/DIPLAN, 2014)

Por otra parte, el consumo de frijol y maíz, se ven afectados por las limitaciones económicas familiares, cuya carencia se refleja en los índices de desnutrición crónica que presenta el país, al ocupar el primer lugar a nivel de Latinoamérica y según el análisis por regiones, la Región VII Noroccidente presenta una prevalencia de desnutrición crónica de 54.9%. (SESAN, MINEDUC & INE, 2018)

La producción de frijol comercial, en la región occidental del país, se concentra en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos, En cuyos departamentos se produce el 4.1% y 1.5% de la producción nacional, respectivamente, distribuido en los municipios de: Nentón, Jacaltenango, San Antonio Huista, Santa Ana Huista, La Democracia, Cuilco, Unión Cantinil, Concepción Huista, Todos Santos Cuchumatán, San Sebastián Huehuetenango, Chiantla, Aguacatan en el departamento de Huehuetenango y en San Miguel, Sibinal, Tajumulco y San Pedro Sacatepéquez en el departamento de San Marcos. (Gonzales, 2016)

El objetivo de esta investigación fue mejorar la rentabilidad a nivel regional, a través del apoyo del Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria CRIA-IICA, que permite el fortalecimiento de las capacidades institucionales en investigación, para apoyar el desarrollo agrícola y rural en Guatemala.

Planteamiento del problema

La producción de frijol negro a nivel nacional no es suficiente para la población guatemalteca (MAGA/DIPLAN, 2014). Uno de los principales problemas a nivel nacional son los bajos rendimientos obtenidos, con un promedio de 14 quintales por manzana. A nivel regional, además de los bajos rendimientos, el diagnóstico realizado por el Programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria, CRIA-IICA (2016), a través de metodologías participativas con actores locales clave, identificó puntos críticos para cada eslabón de la cadena de producción del cultivo. Entre estos los problemas priorizados fueron: a) poca disponibilidad de variedades de acuerdo a los microclimas, resistentes a plagas y al cambio climático, b) alta

incidencia de plagas como: gallina ciega (*Phyllophaga* spp), babosa (*Sarasinula plebeya*), mosca blanca (*Bemisia tabaci*), picudo de la vaina (*Apion godmani.*), conchuela (*Epilachna* spp.), lorito verde (*Empoasca kraemeri*), virus del mosaico dorado (VMDF), c) incidencia de enfermedades del cultivo: roya (*Uromyces appendiculatus*), ascochita (*Ascochyta* spp) y antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) y d) no hay disponibilidad de semillas de buena calidad en la región (Gonzales, 2016).

Justificación

Por lo anterior ICTA-CIALO a través de la Disciplina de Validación y Tránsferencia de Tecnología (DVTT), planteó evaluar el rendimiento y adaptabilidad de genotipos de frijol arbustivo adaptados a los ambientes de occidente de Guatemala, a través de la conducción de ensayos de finca en el altiplano de Huehuetenango y San Marcos. Dichos genotipos biofortificados fueron seleccionados por su resistencia a enfermedades, precocidad, alto rendimiento y alto contenido de micronutrientes (Fe y Zn).

Los rendimientos de frijol negro para Guatemala presentan un promedio de 14 quintales por manzana (MAGA/DIPLAN, 2014). Sin embargo en trabajos previos DVTT, se ha logrado obtener rendimientos de 1.8 a dos quintales por cuerda de genotipos biofortificados (ICTA-CIALO, 2015). Por tal razón, se planteó la investigación de rendimiento y adaptabilidad de estos nuevos genotipos biofortificados de frijol arbustivo, que permitan contribuir a corto plazo con el incremento en el rendimiento del cultivo de frijol en estos dos departamentos.

Con dicha investigación se espera solucionar en parte al punto crítico en el eslabón de producción “Poca disponibilidad de variedades de acuerdo a los microclimas, resistentes a plagas y al cambio climático” (Gonzales, 2016).

2. Marco teórico

2.1. Rendimiento de variedades mejoradas de frijol.

Un estudio sobre la adopción de variedades mejoradas de frijol en las principales zonas productoras de frijol de la Región Brunca de Costa Rica, concluyó que el aumento del área de siembra con variedades mejoradas redujo el uso de variedades criollas, según los productores esto se debe a que las variedades criollas tienen un menor rendimiento y mayor susceptibilidad a las enfermedades (Hernández, 2006).

El rendimiento y estabilidad de líneas mejoradas de frijol negro en Veracruz y Chiapas México, El análisis de la interacción genotipo por ambiente permitió seleccionar genotipos estables, de amplia adaptación y rendimiento superior; así como identificar ambientes en los cuales la interacción con los genotipos fue menor. En los años 2011 y 2012 se sembró un ensayo de rendimiento conformado por diez

líneas avanzadas y dos testigos comerciales de frijol negro (*Phaseolus vulgaris* L.) en doce combinaciones de localidades y sistemas de producción en los estados de Veracruz y Chiapas, México, de acuerdo con análisis AMMI, el efecto ambiental fue mayor que el de genotipos; las localidades de Martínez de la Torre y San Andrés Tuxtla mostraron menor interacción y se consideran adecuadas para realizar selección en el proceso de mejoramiento (López, 2015).

En seis de los doce ambientes de prueba los testigos fueron significativamente ($P < 0.05$) superados por la mejor línea, que fue superior en seis de los 12 ambientes de prueba. Las líneas NGO 07022 y SCN 2 mostraron baja interacción con los ambientes y estuvieron en el grupo de mayor rendimiento. La línea SEN 70 obtuvo el mayor rendimiento promedio (1437 kg ha^{-1}), superior a los testigos Papaloapan y Comapa en 9 y 7 %, respectivamente, pero mostró alta interacción con el ambiente, con adaptación específica en los ambientes de menor rendimiento. (López, 2015)

2.2. Principales características de las variedades mejoradas

Las principales características que buscan los agricultores en una nueva variedad son: mayor rendimiento, resistencia a enfermedades y el porte de la planta, características mencionadas por Mazariegos y Argueta citado por Hernández, et al. (2006) los agricultores buscan además, la consistencia del caldo y el color de grano.

2.3. Característica de los genotipos biofortificados

La estrategia de diversificación alimentaria en Cuba, con la biofortificación del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) con hierro y zinc, desarrollado por la Unidad de Extensión, Investigación y Capacitación Agropecuaria de Holguín (UEICAH) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), establecieron características específicas para los genotipos biofortificados, siendo ellas las siguientes: a) son obtenidos por mejoramiento genético tradicional en el CIAT, sin la utilización de métodos transgénicos y b) en comparación con el frijol tradicional los frijoles biofortificados tienen características de diversa índole de interés, entre estas para los agricultores, buscan mejores características agronómicas, alto rendimiento, resistencia a plagas, tolerancia al estrés; para los consumidores, mantienen las características deseables de color del grano, forma, sabor y tiempo de cocción. Finalmente, para los nutricionistas, el alto valor nutricional, mayor contenido de hierro, zinc, se duplica el contenido de estos elementos con respecto al frijol tradicional (Chaveco, 2005).

Se han identificado tres problemas principales que son requeridos para que los cultivos biofortificados sean exitosos: a) debe ser de alto rendimiento y rentable para el agricultor, b) se debe demostrar que el cultivo biofortificado es eficiente para

reducir la desnutrición y c) el cultivo biofortificado debe ser aceptable tanto para los agricultores como para los consumidores en las regiones objetivo donde las personas padecen desnutrición por micronutrientes. Estos problemas han sido abordados por el programa HarvestPlus (Hotz et al., 2007 citado por Howarth, 2010).

2.4. Progreso de biofortificación en el cultivo de frijol común

El progreso en fitomejoramiento en el cultivo de frijol biofortificado, está enfocado al incremento en el contenido de hierro y zinc (cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen del informe de progreso de biofortificación con hierro y zinc en frijol común.

Cultivo	Base (ppm)		Incremento objetivo (ppm)		Nivel objetivo en el cultivo (ppm)	
	Hierro	Zinc	Hierro	Zinc	Hierro	Zinc
Frijol	50	32	44	17	94	49

Fuente: HarvestPlus 2014.

A la fecha el mejoramiento en frijol común busca altos contenidos de hierro y zinc, la leguminosa alimentaria más común en América Latina, África oriental y meridional, para el efecto se cultivan variedades de frijol arbustivo y trepador. Durante una fase exploratoria (1994–2002), el CIAT en una proyección inicial con más de mil accesiones de germoplasma de frijol, encontró rangos de 30–110 ppm de hierro y 25–60 ppm de zinc en frijoles comunes.

Durante Fase I HarvestPlus (Discovery, 2003–2008), se usaron genotipos con alto contenido de hierro para iniciar cruzas y combinar el rasgo de alto contenidos de minerales con tipos de grano y características agronómicas aceptables. La prueba de genotipo por ambiente (GxE) fue utilizada para verificar que la acumulación de minerales sea estable entre sitios y generaciones. En la Fase II (Desarrollo, 2009–2013), se identificaron varias líneas que expresaban más del ochenta por ciento del nivel objetivo (HarvestPlus, 2014).

Los programas de mejoramiento en los países objetivo Ruanda (Junta de Agricultura de Ruanda – RAB) y la República Democrática del Congo (L'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomique – INERA) han desarrollado cruzas a nivel local. Una reproducción completa consta de germoplasma desarrollado localmente y de introducciones del CIAT. La incorporación de aspectos como hierro en los programas de mejoramiento, tanto en el CIAT como en el RAB, se estima en 50 por ciento y 30 por ciento para INERA. Hasta ahora, se han lanzado nueve variedades en Ruanda y 10 en la RDC. En Ruanda, se lanzaron cuatro variedades de vía rápida de primera generación (dos arbustivos y dos volubles) en 2010 y cinco variedades de frijol voluble de segunda generación en 2012. En RDC, cinco variedades de vía

rápida de primera generación (tres arbustivos y dos volubles) fueron identificados para su liberación y difusión en 2011 y cinco variedades de segunda generación (tres arbustivos y dos volubles) en 2013. (HarvestPlus, 2014)

2.5. Importancia de la biofortificación para la alimentación humana

La biofortificación con micronutrientes de los cultivos básicos se presentan como una herramienta útil para contribuir con la alimentación humana. Como alternativa se busca incrementar el contenido de nutrimentos en los cultivos mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento asistido con biotecnología Welch y Graham, citado por (Arreola, 2015).

La malnutrición de micronutrientes afecta a más de la mitad de la población mundial, especialmente en los países en desarrollo. La biofortificación, que permite la entrega de micronutrientes a través de cultivos, ofrece un enfoque rentable y sostenible para las poblaciones rurales. Actualmente con las técnicas de mejoramiento genético, se ha logrado la disponibilidad de micronutrientes en partes comestibles de los cultivos, especialmente de hierro, provitamina A, zinc y ácido fólico, en concentraciones suficientes para tener un impacto en la salud humana. (Mayer, 2008)

La anemia y el retardo de crecimiento siguen como problemas frecuentes en la población de los países en vías de desarrollo, ambas patologías están asociadas a la deficiencia de hierro y zinc, respectivamente (Grandy, 2010)

HarvestPlus es el programa del Desafío de Biofortificación del CGIAR, dirigido al uso del fitomejoramiento como estrategia de intervención para abordar la desnutrición de micronutrientes, mediante la producción de cultivos alimentarios básicos con niveles mejorados de minerales esenciales y vitaminas biodisponibles, que pueden tener un impacto medible la mejora de los micronutrientes y estado de las poblaciones objetivo, principalmente personas pobres en países en desarrollo. (Howarth, 2010)

2.6. Características de los genotipos biofortificados en evaluación

Los genotipos en estudio se caracterizan por su alto contenido de minerales, especialmente de hierro y zinc, superan 75 y 35 ppm respectivamente, introducidos de CIAT como biofortificados. Estos genotipos se han evaluados en estaciones experimentales de ICTA, en viveros y ensayo nacionales de líneas avanzadas, seleccionadas por precocidad, alto contenido de minerales y tolerancia a enfermedades como Ascochyta, Antracnosis, roya y mancha angular. (ICTA, 2017)

Descripción de los genotipos

L-198 inicia su floración a los 68 DDS, tiene una arquitectura intermedia con un promedio de cinco granos por vaina, alcanza su madurez fisiológica a los 120 días y se cosecha a los 140 días aproximadamente.

L-240 tiene una floración de 65 DDS, alcanza madurez fisiológica a los 115 días, con una arquitectura intermedia con 5 granos por vaina y aproximadamente 135 días a cosecha.

L-51 su germinación es aproximadamente de 10 a 12 días después de la siembra, a los 71 días inicia su floración, presenta mala arquitectura con 5 granos por vaina, teniendo una madurez fisiológica de 126 y cosecha a los 140 DDS.

L-103 tiene floración a los 68 DDS, alcanza madurez fisiológica a los 118 días, con una arquitectura intermedia y 5 granos por vaina, aproximadamente se cosecha a los 135 días.

L-117 tiene floración a los 70 DDS, presenta una excelente arquitectura con cuatro granos por vaina, alcanzando su madurez a los 116 días y 135 a cosecha.

L-123 con floración de 62 DDS, alcanza madurez fisiológica a los 115 días, con una arquitectura intermedia con cinco granos por vaina y aproximadamente 140 días a cosecha.

L-72 inicia su floración a los 70 DDS, tiene una arquitectura mala con un promedio de cinco granos por vaina, alcanza su madurez fisiológica a los 118 días y se cosecha a los 140 días aproximadamente.

L-124 con floración a los 68 DDS, alcanza madurez fisiológica a los 120 días, con una arquitectura intermedia con cinco granos por vaina y aproximadamente 140 días a cosecha.

L-219 inicia su floración a los 65 DDS, tiene una arquitectura intermedia con un promedio de cuatro granos por vaina, alcanza su madurez fisiológica a los 118 días y se cosecha a los 135 días aproximadamente.

L-307 inicia su floración a los 70 DDS, alcanza madurez fisiológica a los 113 días, con una arquitectura intermedia con cinco granos por vaina y aproximadamente 140 días a cosecha. (ICTA, 2017)

2.7. Evaluación de genotipos biofortificados en el área de occidente.

La DVTT del ICTA-CIALO, durante los años 2014-2016, condujo ensayos de finca de cultivares de frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L) en el altiplano occidental de Guatemala, con alto contenido de minerales. Los ensayos agrotécnicos fueron establecidos en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Huehuetenango, Totonicapán y Chimaltenango, todos comprendidos en el rango de alturas de 1,500 a 2,300 msnm. Se evaluaron ocho líneas avanzadas de frijol arbustivo, un testigo biofortificado ICTA Superchiva^{ACM}, dos testigos uno validado y otro por validar, más el testigo local que comúnmente siembra el agricultor. Las líneas evaluadas fueron: L-141, L-142, L-70, L-221, L-51, L-105, L-240, L-117, ICTA Superchiva^{ACM}, ICTA Altense Precoz, ICTA Hunapú Precoz y Testigo local. (ICTA-CIALO, 2015)

Se determinó que las líneas de mejor rendimiento para la región fueron L-70 y L-142, las más estables para el área en estudio fueron: L-117, L-105, L-240 con rendimiento menor a la media de 1893.33 Kg.ha⁻¹ y L-70 con rendimiento de 2041.74 Kg.ha⁻¹, mayor que la media.

En análisis de la opinión del agricultor, prefirieron a ICTA Superchiva^{ACM}, testigo, L-70, L-141 y L-105. Por lo anterior L-70 es una buena alternativa ya que presentó estabilidad, rendimiento y preferencia que indicaron los agricultores. (ICTA-CIALO, 2015)

2.8. Interacción Genotipo x Ambiente (GE)

La interacción GE no es directamente observado en ensayos multi-ambientales, si no es concepto usado para contemplar la inconsistencia de diferencias entre los desempeño de los genotipos a través de los ambientes. Los estudios de interacción permiten clarificar el entendimiento de adaptación en sentido amplio y sentido estricto o específico de ambientes Kang et al, 2004 citado por (Balzarini, 2013)

2.9. Adaptabilidad

Se refiere a la habilidad del genotipo de tener buen desempeño (por ejemplo altos rendimientos) con respecto a determinadas condiciones ambientales. La información provista por los ensayos multi-ambientales permite evaluar adaptabilidad e identificar el tipo y tamaño de la interacción Genética-ambiental (GE) esperada en una región dada para definir, si es necesaria una estrategia de cultivo exitosa con respecto a los efectos de interacción. (Balzarini, 2013)

Los efectos de interacción que son de importancia práctica puede ser maximizado para el desarrollo de germoplasma específicamente adaptado o minimizados para

el desarrollo de material ampliamente adaptado. Cuando el tamaño de los efectos de interacción ente genotipos y localidades (Interacción GE) es pequeño comparado con otras fuentes de variación en la respuesta, particularmente con variación genotípica, se reduce la posibilidad de mejoramiento para adaptación específica (Balzarini, et al. 2013)

Los patrones de adaptación con respecto a localidades individuales son de limitado interés per se, ya que la muestra de sitios o localidades con la que comúnmente se trabaja es muy pequeña comparada con el número de localidades de la región en estudio. (Balzarini, et al. 2013)

3. Objetivos

General

Contribuir con la producción de frijol arbustivo mediante el uso de genotipos con potencial de rendimiento de frijol arbustivo para el altiplano de guatemalteco.

Específicos

Identificar genotipos biofortificados adaptados para los ambientes en estudio.

Evaluar el comportamiento de genotipos biofortificados de frijol arbustivo al complejo de enfermedades presentes.

Determinar el contenido de Fe y Zn, de los genotipos, cultivados en condiciones de finca del agricultor

4. Hipótesis

Ha1: Los genotipos biofortificados de frijol evaluados, superan en condiciones de finca el rendimiento de las variedades tradicionales, debido a sus características agronómicas y tolerancia a enfermedades.

Ho1: Los genotipos biofortificados de frijol arbustivo evaluados, no supera en condiciones de finca, los rendimientos de las variedades tradicionales

Ha2. Los genotipos de frijol arbustivo biofortificados se adaptan a los diferentes ambientes en estudio.

Ho2. Los genotipos de frijol arbustivo biofortificados no se adaptan a los diferentes ambientes en estudio.

5. Metodología

5.1 Localidades y fechas de siembra

Los ensayos se establecieron en cuatro municipios del departamento de Huehuetenango y un municipio del departamento de San Marcos, durante el año 2018 (cuadro 2).

Cuadro 2. Localidades y fechas de siembra de ensayos de frijol arbustivo biofortificados, establecidos en el altiplano de los departamentos de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Departamento	Localidad	Agricultor Colaborador	Fechas de siembra
San Marcos	Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	Ever Israel Hernández	22 de Enero
Huehuetenango	Tuipat, Todos Santos	Andrés Chales	27 de Enero
Huehuetenango	Manzanillo, Aguacatán	Emiliana Hernández	9 de Febrero
Huehuetenango	Pueblo Viejo San Sebastián	Andrés Velásquez	6 de Abril
Huehuetenango	Regadillos, Chiantla	Delfino Velásquez	4 de Septiembre
San Marcos	La Vega, San Miguel Ixtahuacán	Adela Villatoro	13 Septiembre

Fuente: Elaboración propia

La ubicación geográfica, latitud, longitud y altitud de las localidades en estudio (cuadro 3), en donde se establecieron los ensayos.

Cuadro 3. Ubicación geográfica de las localidades donde se establecieron los ensayos en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Localidad	Latitud N	Longitud W	Altitud msnm
Sanshegual	15° 19' 36.98 "	91° 43' 33.55"	1673
Tuipat	15° 33' 44.66 "	91° 39' 30.34 "	2089
Manzanillo	15° 20' 30.26 "	91° 18' 39.01"	1670
Pueblo Viejo	15° 22' 12.39 "	91° 34' 51.26 "	1808
Los Regadillos	15° 21' 49.31 "	91° 28' 24.12 "	1967
La vega	15° 19' 00.60"	91° 42' 27.60"	1600

Fuente: Elaboración propia

Características de los suelos donde se establecieron los ensayos.

Los suelos del departamento de Huehuetenango donde se establecieron los ensayos, según la primera aproximación a la clasificación taxonómica de los suelos en Guatemala, se clasifican en los órdenes de suelos Mollisoles y Entisoles, mientras que para el departamento de San Marcos en las órdenes Entisoles y Andisoles. (IARNA, 2006)

Suelos Entisoles son suelos minerales derivados tanto de materiales aluviónicos como residuales, de textura moderadamente gruesa a fina, de topografía variable entre plana a extremadamente empinada. No tienen horizontes de diagnóstico. (IARNA, 2006)

Los suelos Mollisoles Son suelos superficiales a moderadamente profundos, con epipedón mólico, desarrollados de materiales volcánicos y sedimentarios; tienen horizontes superficiales oscurecidos, estructurados en gránulos bien desarrollados de consistencia friable y dotados suficientemente de bases, principalmente Ca y Mg. Presentan topografía que varía entre ligeramente inclinada a extremadamente empinada. (IARNA, 2006)

5.2 Diseño experimental

Para la investigación se estableció un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones y doce tratamientos. La distribución de los tratamientos en cada repetición fueron aleatorizados, de igual manera para cada ensayo establecido.

5.3 Tratamientos

Los genotipos evaluados corresponden a diez genotipos biofortificados, seleccionadas por su precocidad, tolerancia a enfermedades, alto contenido de micronutrientes (Fe y Zn) y rendimiento, más una variedad biofortificada y una variedad convencional de ICTA.

Cuadro 4. Genotipos de frijol arbustivo biofortificados evaluados en los ensayos de finca en el altiplano de los departamentos de Huehuetenango y San Marcos, Guatemala, 2018.

Tratamientos	Genotipos
1	L-198
2	L-240
3	L - 51
4	L-103
5	L-117
6	L-123
7	L - 72
8	L-124
9	L-219
10	L-307
11	ICTA Superchiva ^{ACM}
12	ICTA Hunapú

5.4 Unidad experimental

La unidad experimental consistió en un área de 9.6 metros cuadrados, formada por cuatro surcos a 0.50 m y doce postura a 0.40 m (2 m * 4.8 m) con tres semillas por postura

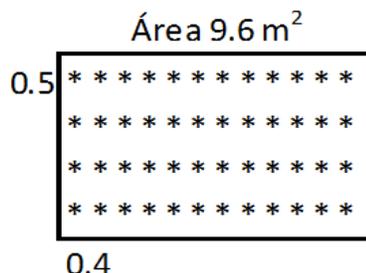


Figura 1. Unidad experimental, evaluación de genotipos de frijol arbustivo biofortificados en los ensayos de finca, establecidos en el altiplano de los departamentos de San Marcos y Huehuetenango 2018.

5.5 Modelo estadístico

Bloque completos al azar, con efecto de localidades.

$$Y_{ijk} = \mu + L_i + B_j + (LB)_{ij} + V_{ijk} + (LV)_{ik} + \epsilon_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk}	=	Representa el k -ésima nivel de la variedad, de la i -ésima localidad en el j -ésima bloque
μ	=	media general
L_i	=	Representa la i -ésima nivel de localidad
B_j	=	Representa la j -ésima bloque
$(LB)_{ij}$	=	Error experimental de la localidad
V_k	=	Representa el efecto del k -ésima variedad dentro k -ésima localidad del j -ésima bloque
$(LV)_{ik}$	=	Representa la interacción del factor localidad
ϵ_{ijk}	=	Error experimental de la variedad y la interacción LV

Modelo para determinar la respuesta de un genotipo en un ambiente dado

$$y_{ij} = \mu + G_i + A_j + \sum_{n=1}^N \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj} + p_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

G_i	Efecto del genotipo i
A_j	Efecto del ambiente
$\sum_{n=1}^N \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj}$	Sumatoria de términos multiplicativos que modela la interacción GE, compuesto por el parámetro de interacción del j -ésimo ambiente, denotado por ξ_{ni} , y el auto valor asociado al eje denotado por λ_n .
p_{ij}	Porción del ij -ésimo término de la interacción GE no explicada por el modelo multiplicativo
ϵ_{ij}	Término de error aleatorios
η_{nj}	Sensibilidad genotípica a los factores ambientales latentes, los cuales representado por η_{nj} el-ésimo ambiente.

5.6. Variables de respuesta

Las variables de respuesta de la investigación fueron medidas según el sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol (CIAT, 1991).

Variables registradas:

Objetivo: Identificar genotipos adaptados para los ambientes en estudio.

1. Vainas por planta: se contaron diez plantas al azar dentro de la parcela bruta, contando las vainas de cada una, posteriormente se obtuvo la media.
2. Granos por vaina: Se tomaron veinte vainas al azar correspondiente a diez plantas de la parcela bruta, contando los granos de cada vaina y sacando la media al final.
3. Tamaño de la semilla: El tamaño de la semilla se expresó como el peso en gramos de cien semillas escogida al azar (CIAT, 1991), según la siguiente escala: Pequeño, menos de 25 g; mediano, 25 g a 40 g y grande, mayor de 40 g.
4. Rendimiento: Peso del grano cosechado en la parcela neta a 14 % de humedad expresada en Kg ha^{-1} .
5. Días a floración: Se registró los días después de la siembra a la floración, que coincidieron con el inicio de desarrollo R6, cuando el 50% de las plantas tenían una o más flores (CIAT, 1991).

6. Días a madurez: Se registró los días después de la siembra que coincidieron con el inicio de la etapa de desarrollo R9, cuando el 50% de las plantas alcanzaron madurez fisiológica. (CIAT, 1991)

Objetivo. Evaluar el comportamiento de genotipos biofortificados de frijol arbustivo al complejo de enfermedades presentes.

Variable medida:

7. Comportamiento de las enfermedades principales de frijol. (Roya y antracnosis). Se hizo según lo establecido por CIAT, se utilizó la escala para la medición de enfermedades. 1 - 3 Resistente, 4 - 6 Intermedio y 7 - 9. Susceptible.

Objetivo. Determinar el contenido de Fe y Zn, de los genotipos cultivados en condiciones de finca del agricultor.

Variable medida

8. Concentración de Hierro y Zinc en mg/Kg de los genotipos.

Fueron analizados los granos procedentes de dos ensayos, ubicados en las localidades de Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán en el departamento de San Marcos y Los Regadillos del municipio de Chiantla en el departamento de Huehuetenango.

Procedimiento en campo

El procedimiento en campo para el muestreo de frijol consistió en hacer antes de la cosecha la recolección al azar en cada repetición de diez vainas bien llenas de cada genotipo, colocando las vainas en bolsas de papel nuevo y limpio, se evitó el contacto con polvo y tierra, tal como establece el protocolo de muestreo en cultivos para análisis de micronutrientes establecido por HarvesPlus. (HarvestPlus, 2009)

Análisis en laboratorio

La primera muestra fue tomada en la localidad de Sanshegual del municipio de San Miguel Ixtahuacán en el departamento de San Marcos, analizadas en los laboratorios de Desarrollo de Soluciones Globales DSG Guatemala. Se utilizó la metodología de espectrofotometría con digestión ácida para Hierro con límite de detección 0.05 y espectrofotometría para Zinc y límite de detección 0.30

La segunda muestra fue tomada en la localidad de Los Regadillos del municipio de Chiantla en el departamento de Huehuetenango. Fueron analizadas en el laboratorio de Química Agrícola del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal CENTA, El Salvador, se siguió la metodología Fluorescencia de Rayos X.

5.7. Análisis de la información

Modelos Lineales Generales Mixtos MLM.

Los modelos mixtos son una propuesta de modelación estadística avanzada, que permiten mejorar la calidad de análisis de los factores aleatorios, modelado la variabilidad aleatoria y la correlación de los errores, esto es útil en análisis de datos desbalanceados, datos con pseudoréplicas, o datos con algún tipo de estructuras jerárquica o de agrupación (Di Rienzo, 2009).

Por tal razón en la investigación y con ayuda del software InfoStat se realizó la aplicación de modelos generales y mixtos MLM sobre la variable rendimiento. El análisis de los componentes de la varianza por MLM, comprobó la hipótesis de la investigación. Para dicho proceso se creó el modelo, efectos fijos los tratamientos o genotipos de frijol arbustivo biofortificados, localidades en estudio e interacción Genotipo*Localidad, efectos aleatorios, el bloque o repetición del ensayo y las épocas en que fueron sembrados, especificando en estructura de la correlación, la opción errores independientes y para la especificación de la estructura de varianzas de los errores, se admitió VarIdent (Identidad) en la solapa Heteroscedasticidad. Se utilizó como covariable el número de plantas por unidad experimental.

Comparación de medias LSD.

Al encontrarse diferencia significativa entre los tratamientos, se hizo necesario la comparación de medias de rendimiento de los tratamientos y localidades a través del test LSD (Least significant difference) de Fisher. (Balzarini, M. G., et al. 2008) para determinar tratamientos o genotipos con mejores rendimientos.

Análisis de estabilidad AMMI 1.

Para determinar la adaptabilidad de los genotipos en estudios se hizo a través de los modelos AMMI. (Del inglés Additive Main effects and multiplicative interaction), (Zobel, 1998 & Gauch, 1998).

Cuando se usa análisis de componentes principales, los genotipos con valores cercanos a cero en la CP1 son interpretados como adaptados a los ambientes de prueba o de menor contribución en la interacción GE.

Los modelos AMMI, suelen denominarse como AMMI 1, AMMI 2, AMMI...n, dependiendo del número de componentes principales usadas para modelar la interacción. Existen prueba estadísticas que pueden implementarse para la selección del mejor modelo (Macchiavelli y Beaver, 1999 citados por Balzarini, 2013).

Modelo SREG-Biplot GGE.

El modelo de regresión lineal por sitio (SREG Cornelius et al, 1996., Crossa y Cornelius 1997 y 2002), permitieron identificar genotipos ganadores para un conjunto de ambientes, debido a que remueven el efecto de sitio y solo expresan la respuesta en función de G+GE. Esto permitió hacer recomendaciones de genotipos específicos para los municipios y departamentos en estudio.

Los modelos de regresión por sitio (SREG, Cornelius et al, 1996., Crossa y Cornelius, 1997 y 2000) Son aconsejables cuando los sitios o ambiente constituyen la fuente de variación más importante en relación a la contribución de los genotipos y la interacción GE sobre la variabilidad total, situaciones estas muy comunes en la práctica. Para visualizar los patrones de interacción como remoción de los efectos de ambiente (datos centrados por sitios) Yan et al (2000) propone los gráficos GGE biplots. A partir de estos gráficos se puede investigar la diferenciación de mega-ambientes entre los ambientes en estudio y seleccionar cultivares superiores en un mega-ambiente dado.

Análisis multivariado por componentes principales ACP

El ACP fue utilizado para encontrar la relación e interacción entre las variables medidas, días a floración, días a madurez fisiológica, peso de 100 granos, número de vainas por planta a un genotipo en específico.

ACP permite analizar la interdependencia de variable métricas y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos de una tabla de n observaciones y p variables. ACP permitió encontrar con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variable (componentes principales) no correlacionadas que expliquen la estructura de variación en las filas de la tablas de datos (Di Rienzo, 2009)

5.8 Manejo del experimento

Se realizó según las recomendaciones del ICTA para la producción de comercial y de semilla de frijol (ICTA, 2010)

Preparación del terreno

Se hizo un barbecho o movimiento de suelo profundo entre 30 y 40 centímetros inmediatamente después de la cosecha del cultivo anterior.

Época de siembra

Fueron establecidos en época seca y lluviosa, debido a que son utilizadas habitualmente en los municipios en estudio. Sin embargo, para el altiplano occidental se recomienda sembrar a partir del 1 de junio al 20 de julio, siembras muy tempranas sufren de las últimas lluvias del invierno y muy tardías se exponen a las bajas temperaturas. Las fechas de siembra para cada localidad y ensayo se encuentran especificadas en el cuadro 2.

Distanciamiento de siembra

Por ser variedades de porte intermedio se sembraron a 50 centímetros entre surco y 40 centímetros entre posturas, colocando tres semillas por postura.

Manejo de la fertilización

Se realizó a los 10 días después de la siembra, el frijol presenta una buena respuesta, a la aplicación de nitrógeno y fósforo con dosis de 40-40-40 kg ha⁻¹, se aplicó 25 libras por cuerda de 438 m² de fertilizante 15-15-15.

Manejo fitosanitario

El control de insectos se realizó desde el momento de la siembra con productos a base de Clorpirifos, para evitar daños en las primeras etapas del cultivo principalmente a las raíces (gallina ciega, coralillo, gusano nochero). Para el control de las pudriciones radicales ocasionadas por los hongos del complejo Damping off, se hicieron aplicaciones químicas con Triazol + Metil Tiofanato, el control de plagas del follaje se realizó con Thiacloprid, Beta-Ciflutrina, a los 35 días después de la siembra, repitiendo a los 15 días cuando se observó nuevamente un daño en el cultivo.

Manejo de las malezas

Se realizó de forma manual en la mayoría de ensayos utilizando azadones y otras herramientas de labranza entre los 25 y 30 días después de la siembra, únicamente en localidades donde se presentó mayor presencia de malezas, se aplicó un herbicida selectivo a base de Fomesafen en sus fases iniciales de crecimiento del cultivo.

Toma de datos: Se realizó en fase reproductiva del cultivo y al momento de la cosecha

Cosecha

Se realizó cuando las plantas llegaron a su madurez fisiológica, el cambio de coloración en las vainas.

6. Resultados y discusión

Los ensayos fueron establecidos durante el año 2018 en cuatro localidades del departamento de Huehuetenango y dos localidades del departamento de San Marcos, las fechas de siembra y cosecha (cuadro 5).

Cuadro 5. Fechas de siembra y cosecha de ensayos de frijol arbustivo biofortificados, establecidos en seis localidades en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Localidad	Fechas de siembra	Fecha de Cosecha
Aldea Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	22 de Enero de 2018	22 de mayo de 2018
Aldea Tuiapat, Todos Santos Cuchumatan	27 de Enero de 2018	20 de junio de 2018
Aldea Manzanillo, Aguacatán	9 de Febrero de 2018	28 de junio de 2018
Aldea Pueblo Viejo San Sebastián Huehuetenango	6 de Abril de 2018	19 de julio de 2018
Cantón Regadillos, Chiantla	4 de Septiembre de 2018	14 de enero de 2019
Cantón La Vega, San Miguel Ixtahuacán	13 de Septiembre de 2018	12 de enero de 2019

Fuente: Elaboración propia

6.1. Rendimiento

En análisis de la varianza encontró que existe diferencia significativa en el rendimiento de los genotipos, entre localidades y en la interacción genotipo X localidad ($p=0.05$) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Análisis de varianza combinado para seis localidades sembrados en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Source	NumDF	denDF	F-value	p-value
Genotipo	11	132	2.02	0.0316
Localidad	5	11	34.79	<0.0001
Genotipo : Localidad	55	132	1.89	0.0017

NumDF: Grados de libertad del numerador

denDF: Grados de libertad del denominador

En este sentido, la prueba de medias en la interacción genotipo-ambiente (cuadro 7), muestra que en la localidad de Sanshegual San Miguel Ixtahuacán, se expresaron

mejor los genotipos L-123, L-240 y los genotipos restantes ubicados en los grupos B- G, con excepción de ICTA Hunapú, que en el test de significancia está ubicando en un grupo diferente (M)

En la localidad de Los Regadillos del Municipio de Chiantla se expresó mejor el genotipo ICTA Hunapú (Grupo H), para la localidad Tuipat en el municipio de Todos Santos los genotipos ICTA Hunapú, ICTA Superchiva^{ACM} y L-123 (Grupo H), en la localidad La Vega de San Miguel Ixtahuacán el genotipo L-103 (Grupo I), en la localidad el Manzanillo Aguatan el genotipo L-72 (grupo Q) y Pueblo Viejo San Sebastián L-240 (Grupo S) (Cuadro 7).

El análisis demuestra que el genotipo ICTA Hunapú responde en los ambientes estudiados, para el efecto se ubica como mejor rendimiento en dos localidades: Los Regadillos y Tuipat en el departamento de Huehuetenango, con medias de rendimiento de 2669 y 2627 Kg. ha⁻¹ respectivamente, mientras que los genotipos ganadores restantes solo lo hicieron en una localidad.

Cuadro 7. Medias ajustadas y errores estándares para la interacción Localidad*Genotipo LSD Fisher (Alfa=0.05), variable rendimiento Kg. ha⁻¹, Huehuetenango y San Marcos 2018

Localidad	Genotipo	Medias Kg. ha ⁻¹	E.E.	
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-123	3989.24	526.85	A
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-240	3916.76	335.57	A
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-103	3684.99	292.98	B
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-72	3642.33	362.69	C
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-219	3630.86	325.47	C
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-51	3618.89	337.89	D
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-117	3551.20	394.14	D
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-307	3133.41	298.63	E
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	ICTA Superchiva ^{ACM}	3069.50	424.93	F
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-198	3052.17	325.26	F
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	L-124	2958.97	339.54	G
Los Regadillos, Chiantla	ICTA Hunapú	2669.53	518.84	H
Tuipat, Todos Santos	ICTA Superchiva ^{ACM}	2640.98	424.93	H
Tuipat, Todos Santos	ICTA Hunapú	2627.79	518.84	H
Tuipat, Todos Santos	L-123	2528.21	526.85	I
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-103	2504.23	292.98	I
Tuipat, Todos Santos	L-219	2403.90	325.47	J
Los Regadillos, Chiantla	L-51	2362.13	337.89	K
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-51	2268.58	337.89	K
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-72	2225.74	362.69	K
Tuipat, Todos Santos	L-198	2223.15	325.26	K
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	ICTA Hunapú	2168.30	518.84	L
Los Regadillos, Chiantla	L-117	2140.28	394.14	L
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-198	2121.86	325.26	L
Los Regadillos, Chiantla	L-123	2118.26	526.85	M
Sanshegual, San Miguel Ixtahuacán	ICTA Hunapú	2093.32	518.84	M
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-307	2064.30	298.63	M
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	ICTA Superchiva ^{ACM}	2045.33	424.93	N
Los Regadillos, Chiantla	L-240	2040.52	335.57	N
Tuipat, Todos Santos	L-72	2039.23	362.69	O
Tuipat, Todos Santos	L-117	2030.88	394.14	O
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-117	1993.16	394.14	O
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-240	1987.51	335.57	O
Los Regadillos, Chiantla	L-124	1943.64	339.54	P
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-124	1934.00	339.54	P
Los Regadillos, Chiantla	L-72	1923.53	362.69	P
Los Regadillos, Chiantla	L-103	1882.45	292.98	P
Manzanillo, Aguacatán	L-72	1865.19	362.69	Q
Tuipat, Todos Santos	L-219	1847.67	325.47	Q
Los Regadillos, Chiantla	L-219	1786.06	325.47	Q
Manzanillo, Aguacatán	ICTA Hunapú	1781.66	518.84	R
La Vega, San Miguel Ixtahuacán	L-123	1685.56	526.85	S
Tuipat, Todos Santos	L-307	1637.45	298.63	S
Tuipat, Todos Santos	L-240	1588.01	335.57	S
Los Regadillos, Chiantla	L-307	1582.86	298.63	S
Los Regadillos, Chiantla	L-198	1579.63	325.26	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-240	1537.37	335.57	S
Manzanillo, Aguacatán	L-103	1490.28	292.98	S
Tuipat, Todos Santos	L-103	1472.85	292.98	S
Tuipat, Todos Santos	L-124	1408.85	339.54	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-124	1352.12	339.54	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-123	1315.47	526.85	S
Los Regadillos, Chiantla	ICTA Superchiva ^{ACM}	1289.93	424.93	S
Manzanillo, Aguacatán	L-123	1268.86	526.85	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-103	1190.31	292.98	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-72	1150.49	362.69	S
Manzanillo, Aguacatán	L-124	1148.64	339.54	S
Manzanillo, Aguacatán	L-117	1137.72	394.14	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-198	1121.32	325.26	S
Tuipat, Todos Santos	L-51	1112.31	337.89	S
Manzanillo, Aguacatán	L-219	1098.87	325.47	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-219	953.75	325.47	S
Manzanillo, Aguacatán	L-198	947.52	325.26	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-117	923.6	394.14	S
Manzanillo, Aguacatán	L-307	886.71	298.63	S
Manzanillo, Aguacatán	ICTA Superchiva ^{ACM}	870.01	424.93	S
Pueblo Viejo San Sebastián	ICTA Hunapú	810.08	518.84	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-307	764.58	298.63	S
Pueblo Viejo San Sebastián	L-51	759.53	337.89	S
Pueblo Viejo San Sebastián	ICTA Superchiva ^{ACM}	712.81	424.93	S
Manzanillo, Aguacatán	L-51	692.11	337.89	S
Manzanillo, Aguacatán	L-240	499.37	335.57	S

6.2. Genotipos adaptados para los ambientes evaluados

Según el análisis MLM, se determinó que existe interacción genotipo-ambiente (Cuadros 6), para el efecto se hace el análisis por los modelos bilineales regresión por sitio SREG y modelos de efectos aditivos e interacción multiplicativa o modelo AMMI.

El análisis SREG (Figura 2), con un 67.7% de variabilidad, permitió identificar genotipos ganadores para ambientes específicos, detallados a continuación en el Biplot.

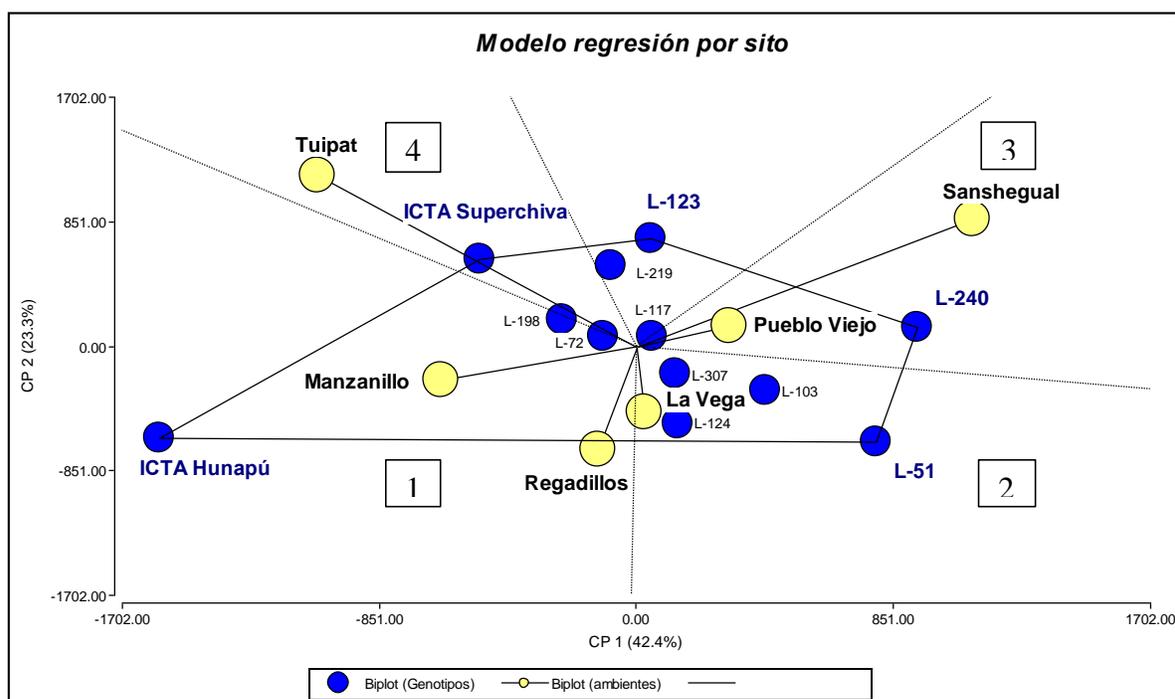


Figura 2. Biplot GEE para la identificación de genotipos rendidores en cada ambiente, puntos azules representan genotipos y puntos amarillos los ambientes

En el biplot se forma cuatro ambientes, el primero de ellos conformado por las localidades: Manzanillo, Aguacatan y Regadillos, Chiantla, ambos del departamento de Huehuetenango, en estos el genotipo ICTA Hunapú fue superior, seguido de los genotipos L-198 y L-72 con menor rendimiento. Un segundo ambiente formado por la localidad La Vega de San Miguel Ixtahuacán, San Marcos, donde el genotipo de mayor rendimiento fue L-51, seguido de los genotipos L-124, L-103 y L-307. En el tercer ambiente conformado por las localidades de Pueblo Viejo San Sebastián, Huehuetenango y Sanshegual San Miguel Ixtahuacán, San Marcos, el genotipo de mejor rendimiento fue L-240, y un último ambiente formado por Aldea Tuipat, Todos Santos Cuchumatán, en donde el genotipo ganador fue ICTA Superchiva^{ACM}.

6.3. Modelo AMMI 1 (Additive Main effects and Multiplicative Interaction)

Cuando se usa análisis de componentes principales, los genotipos con valores cercanos a cero en la CP1, son interpretados como adaptados a los ambientes de prueba o de menor contribución en la interacción genotipo*ambiente. (Zobel *et al.* 1998 & Gauch 1998), en atención a esto se determinó que los genotipos adaptados a los ambientes evaluados fueron L-72, L-117, L-219 y L-123, todos con rendimientos superiores a la media. (Figura 3)

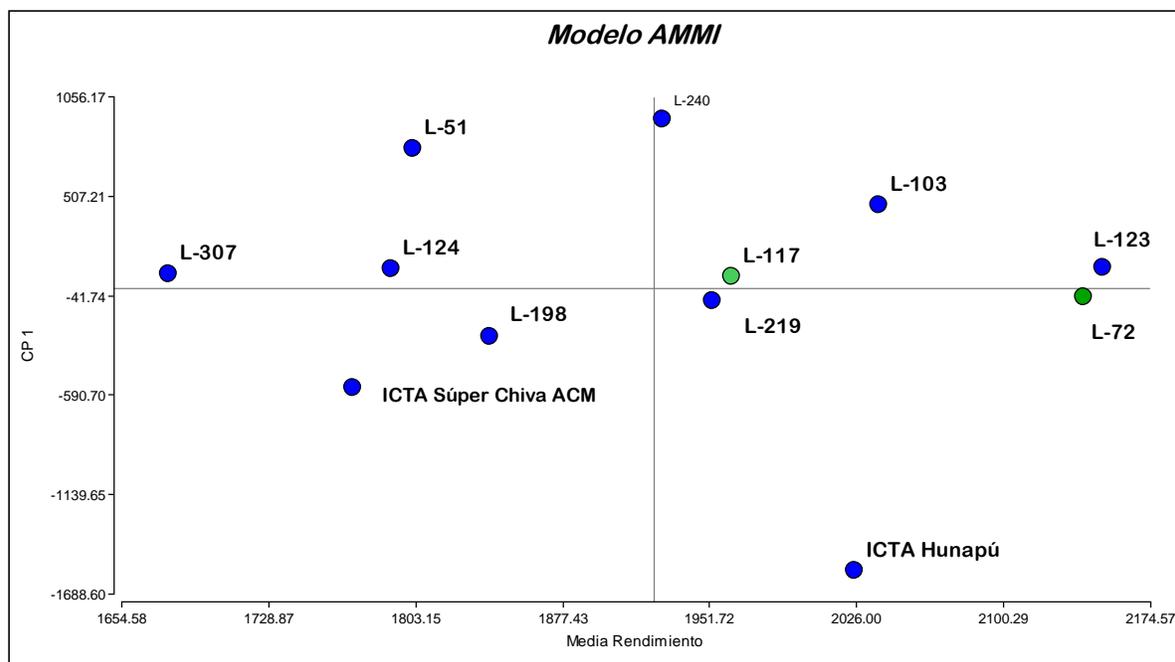


Figura 3. Biplot modelo AMMI 1 para las localidades en estudio, genotipos más cercanos a 0 son interpretados como adaptados, Huehuetenango y San Marcos 2018.

El un análisis AMMI 1 (Figura 3), muestra que los cuatro genotipos adaptados a los ambientes bajo investigación y con rendimientos superiores a la media. Los resultados indican que los genotipos mantienen sus rendimientos en los diferentes ambientes.

6.4. Análisis de Componentes Principales de las variables en la investigación

El análisis de componente principal indica que se explica un 72 % de la variabilidad en sus dos componentes iniciales (Cuadro 10). El CP1 hace una división entre las variables componentes de rendimiento y altura de planta.

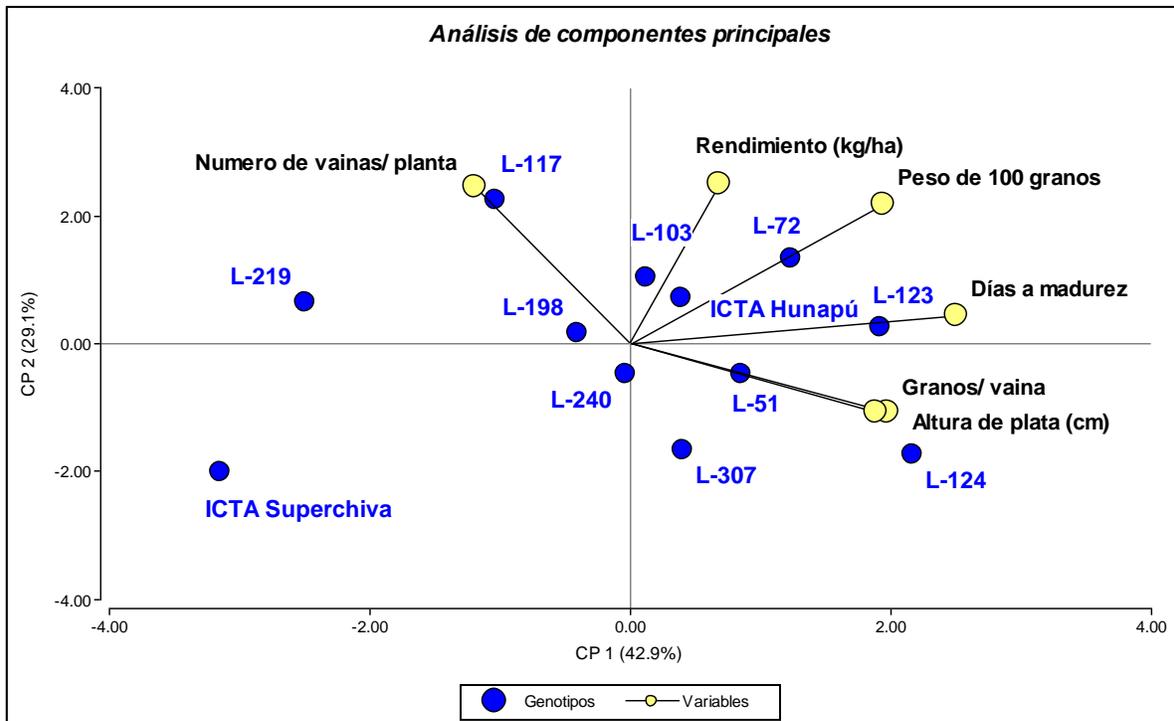


Figura 4. Análisis de componentes principales para las variables medidas en seis localidades en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos.

El resultado del análisis de componentes principales (Cuadro 8) indica la proporción de la variabilidad expresada en cada uno de los componentes generados, de igual manera la variabilidad explicada en forma acumulada hasta alcanzar el 100%. Se puede apreciar que los componentes 1 y 2, presentan mayor peso tal como se muestra en la casilla valor para cada componente. No fue necesario pedir un tercer componente en el biplot, debido que es mínima la variabilidad expresada en este componente (16%).

Cuadro 8. Análisis de componentes principales, datos estandarizados. Autovalores para las variables medias en seis localidades de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Lambda	Valor	Proporción	Proporción Acumulada
1	2.57	0.43	0.43
2	1.74	0.29	0.72
3	0.97	0.16	0.88
4	0.43	0.07	0.95
5	0.18	0.03	0.98
6	0.11	0.02	1.00

Los autovectores generados (e1 y e2) por el ACP (Cuadro 9), muestran los coeficientes con que cada variable medida fue ponderada en los componentes CP1 y CP2. Se puede observar todas las variables tienen importancia en la variabilidad general, no así la variable número de vainas por planta presenta un peso negativo para e1, mientras que para e2 las variables altura de planta y granos por vainas, lo que indica que existe una interacción negativa entre dichas variables (Figura 4).

Cuadro 9. Análisis de componentes principales, datos estandarizados. Autovectores para las variables medidas en seis localidades de Huehuetenango y San Marcos 2018.

Variables	e1	e2
Altura de planta (cm)	0.45	-0.24
Días a madurez	0.57	0.1
Numero de vainas / planta	-0.27	0.56
Granos / vaina	0.43	-0.24
Peso de 100 granos	0.44	0.49
Rendimiento (kg. ha ⁻¹)	0.16	0.57

Como se puede observar (figura 4), el genotipo L-177 está asociado a la variable número de vainas por planta (22 vainas), los genotipos L-72 y L-103 asociados a la variable rendimiento (2141 y 2037 Kg. ha⁻¹), el genotipo L-123 a días a madurez (122 DDS) y el genotipo L-124 a las variables granos por vaina (6 granos) y altura de planta (54 cm). Existe una interacción positiva entre las variables número de vainas por planta, peso de 100 granos con el rendimiento kg.ha⁻¹, mientras que una interacción negativa entre número de vainas por planta con altura de planta y granos por vaina, indicando que se ven afectadas entre ellas. (Cuadro 9)

6.5. Análisis de Correspondencia (AC) para enfermedades

El AC exploratorio, representa gráficamente la asociación entre los genotipos evaluados y la incidencia de Roya y Antracnosis, presentado en las localidades en investigación (Figura 5).

Análisis de correspondencia Genotipos - Roya (*Uromyces appendiculatus*)

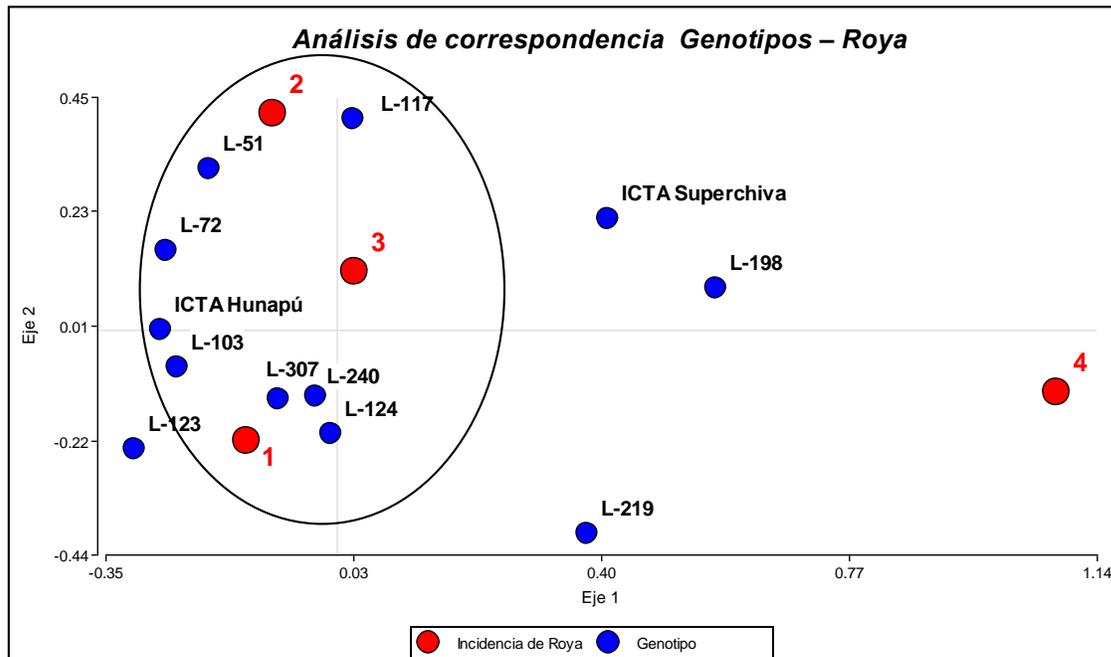


Figura 5. Incidencia de Roya, según escala para la medición de enfermedades. 1 - 3 Resistente, 4 - 6 Intermedio y 7 - 9. Susceptible. (CIAT, 1991)

El análisis de correspondencia indica que todos los genotipos dentro del círculo en la figura 5, clasificados en la escala de tolerantes o resistentes a la enfermedad, siendo ellos: L-123, L-124, L-307, L-103, ICTA Hunapú, L-72, L-51, L-117, mientras que los genotipos L-219, L-198 e ICTA Superchiva^{ACM} manifestaron presencia de roya, clasificándose como una categoría intermedia.

Las condiciones ambientales de las localidades (Cuadro 12), no fueron ideales para su reproducción específicamente para la humedad del ambiente, debido a que el desarrollo de la enfermedad en las plantas la temperatura, humedad relativa y la lluvia son factores críticos.

Las condiciones óptimas para el desarrollo de roya (*Uromyces appendiculatus*) son, humedad relativa mayor a 85%, temperaturas entre 20 a 25°C y mojados foliares de 18 a 24 horas (Gurvlnder & Gupta, 2019), por lo tanto no se presentaron las condiciones ambientales a cabalidad durante el año 2018 que favorecieran el desarrollo del hongo, estando los resultados obtenidos más asociados a las condiciones climáticas del año a una respuesta de resistencia o tolerancia de los genotipos a la enfermedad.

Análisis de correspondencia

Genotipos–Antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*)

El análisis de correspondencia para la incidencia de antracnosis se encuentra representado en la figura 5.

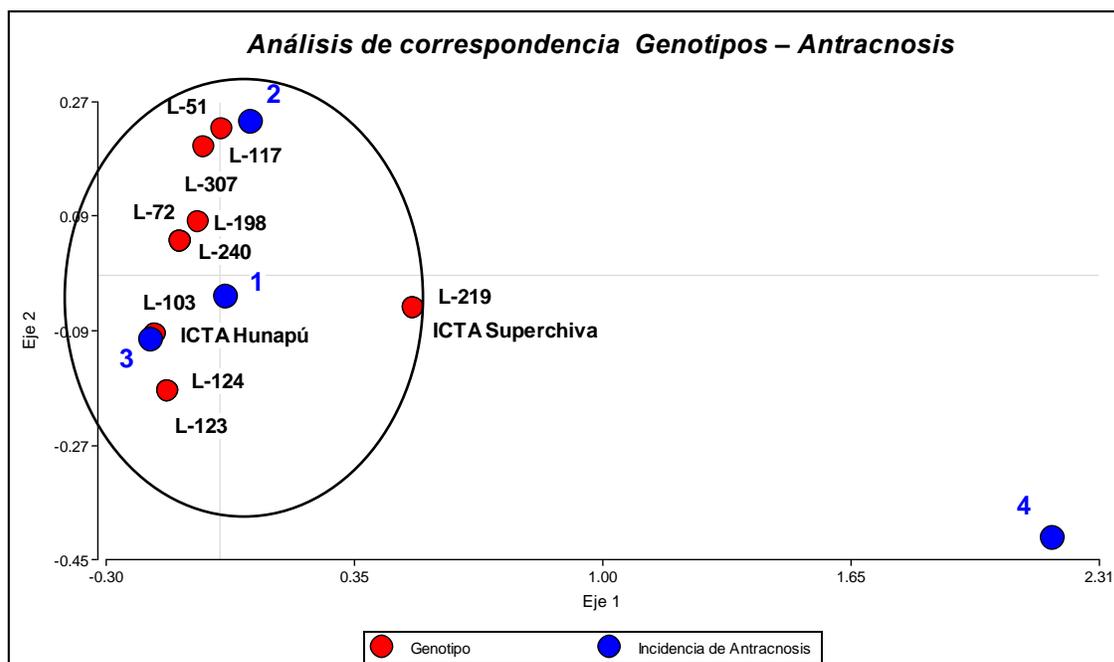


Figura 6. Incidencia de Roya, según escala para la medición de enfermedades. 1 - 3 Resistente, 4 - 6 Intermedio y 7 - 9. Susceptible. (CIAT, 1991)

Se puede observar que los genotipos: L-51, L-117, L-307, L-72, L-198, L-240, L-103, ICTA Hunapú, L-124, L-123 e ICTA Superchiva^{ACM}, se ubican en la escala de resistentes o tolerantes.

Tomando en cuenta las condiciones ambientales del año 2018 (Cuadro 12), se considera que no fueron ideales para que el patógeno ejerciera presión sobre los genotipos, dadas que las condiciones óptimas para el desarrollo de la enfermedad son temperaturas que oscilan entre 13° y 26°C, siendo 17°C la temperatura óptima, con una humedad relativa arriba de 92%, la cual favorece la germinación de esporas para la infección inicial. (Mohammed, 2013)

Por tal razón haciendo el cotejo con condiciones ambientales de las localidades en evaluación, la temperatura se encuentra entre el rango estimado para el desarrollo de la enfermedad, no así para la humedad del ambiente, por lo que no se cumple a cabalidad las condiciones óptimas que demanda el hongo para su reproducción, considerando la respuesta de los genotipos a la enfermedad más asociado a las

condiciones de clima que al atributo de los genotipos de resistencia o tolerancia a la enfermedad.

Cuadro 10. Condiciones climáticas de los municipios donde se establecieron los ensayos, en los departamentos de Huehuetenango y San Marcos año 2018.

Localidad	Temperatura Media anual (°C)	Precipitación pluvial media anual (mm)	Humedad Relativa (%)
Todos Santos	14.1	1,149.00	78.5
San Sebastián Huehuetenango	20.5	1,500.00	72.5
Chiantla	18.0	1,250.00	60.0
Aguacatán	15.0	1,500.00	80.0
San Miguel Ixtahuacán	17.2	1,738.90	70.0

Fuente: PDM, 2010., INE, 2016., & AccuWeather, 2018

6.6. Contenido de Hierro (Fe) y Zinc (Zn), de los genotipos de frijol cultivados en condiciones de finca del agricultor.

Las concentraciones de hierro y zinc (cuadro 13) de los genotipos de frijol tomados del ensayo de Sanshegual San Miguel Ixtahuacán San Marcos, se consideran elevados, con relación a los Chiantla Huehuetenango (cuadro 14). Sin embargo fueron analizados en diferentes laboratorios. Por tal razón, los resultados de San Miguel Ixtahuacán se toman con cierta reserva, ya que el laboratorio de El Salvador es la recomendada para estos análisis.

Cuadro 13. Concentraciones de Hierro y Zinc en granos de frijol, Sanshegual San Miguel Ixtahuacán San Marcos. Guatemala, 2018

Genotipo	mg/kg	
	Fe	Zn
L-103	73.75	34.23
L-124	56.06	34.00
L-307	81.50	33.50
L-198	66.25	25.50
L-240	76.01	37.05
L-219	86.05	38.50
L-51	72.05	31.67
L-123	62.70	27.40
ICTA Superchiva ^{ACM}	66.25	22.45
L-117	85.00	31.44
L-72	70.15	26.25

Fuente: DSG Laboratorios, Guatemala 2018

La concentración de Fe y Zn que reportan los análisis de laboratorio para el frijol arbustivo producido en Los Regadillo del municipio de Chiantla Huehuetenango (cuadro 14).

Cuadro 14. Contenido de micronutrientes en genotipos de frijol arbustivo, cultivados en Los Regadillos municipio de Chiantla Huehuetenango, Guatemala, 2018.

Genotipo	mg/kg	
	Fe	Zn
L-103	57.5	31.9
L-124	52.8	26.7
L-307	60.1	33.3
L-198	50.2	29.4
L-240	51.2	29.7
L-219	50.2	33.0
L-51	53.3	30.8
L-123	53.4	31.0
ICTA Superchiva ^{ACM}	54.3	31.5
L-117	51.5	29.6
L-72	49.9	30.3
ICTA Hunapú	46.5	28.1

Fuente: Laboratorio de Química Agrícola, Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal CENTA, El Salvador 2019.

HavestPlus en el documento línea base, incremento del mejoramiento y nivel objetivos para los cultivos biofortificados, establece para el cultivo de frijol un contenido de 94 ppm de Fe y 49 ppm de Zn. (HarvestPlus, 2014)

Los valores de referencia según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en 2013 indican contenidos de hierro en frijol que varían de 50 a 80 ppm. Los valores inferiores o iguales a 50 ppm se consideran bajos, mientras que los valores por encima de 80 ppm se consideran biofortificados. Por otra parte, los niveles de zinc varían entre 20 y 36 ppm, los valores en las variedades regulares de frijol son generalmente inferiores o iguales a 20 ppm (Brigide et al. 2014, citado por Tofiño et al., 2016)

Cotejando los resultados obtenido en ambas localidades, las concentraciones de Fe y Zn están por debajo de los niveles establecidos por HarvestPlus.

Sin embargo haciendo el mismo cotejo con los establecido por USDA, únicamente en la localidad de Sanshegual San Marcos se encuentra a los genotipos L-307, L-219 y L-117 con concentraciones de Fe superiores a 80 mg/Kg o ppm. Para el caso de Zn se encuentran los genotipos L-103, L-124, L-240 y L-129 con concentraciones superiores a 34 mg/Kg o ppm.

Para el efecto el genotipo L-219 cumple con los niveles de Fe y Zn establecidos por USDA, por lo que se considera una alternativa para validar su desempeño agronómico en regiones del país con altos índices de desnutrición.

Al hacer una comparación de las concentraciones reportadas por ambos laboratorios, existe una diferencia bien marcada para los micronutrientes. Los análisis realizados en el CENTA, la demora en la entrega de las muestras al laboratorio afectó los resultados. La muestra de tejido vegetal, frutos o semillas se debe tener el menor tiempo posible para evitar cambios químicos (McKean, 1993). “La calidad del grano de frijol dependerá del tiempo en que se tenga almacenado, temperatura de almacenamiento y las características intrínsecas del grano, principalmente la humedad de este” (Mederos, 2006)

7. Conclusiones

ICTA Hunapú fue superior en El Manzanillo Aguacatan y Los Regadillos, Chiantla, L-51 para La Vega de San Miguel Ixtahuacán, L-240 para Pueblo Viejo San Sebastián y Sanshegual San Miguel Ixtahuacán, por último la variedad ICTA Superchiva^{ACM} para Tuipat Todos Santos Cuchumatan.

Los genotipos L-72, L-117, L-129 y L-123 presentaron estabilidad de rendimiento en los seis ambientes evaluados

La respuesta de los genotipos al daño por las enfermedades roya y antracnosis, no se consideran como tal una resistencia o tolerancia al patógeno, debido a que las condiciones ambientales no fueron óptimas para el desarrollo del mismo.

Las concentraciones de Fe y Zn de los genotipos están por debajo de los niveles establecidos por HarvestPlus para catalogarlos como biofortificados, sin embargo lo establecido por USDA únicamente el genotipo L-219 cumple con los niveles establecidos.

8. Recomendaciones

Seguir con la fase de validación los genotipos biofortificados L-72 y L-123, por presentar mayores rendimientos y estabilidad a los ambientes evaluados.

Promover la siembra de los genotipos tomando en cuenta el resultado de la regresión por sitio, para favorecer el desempeño agronómico de los mismos.

9. Referencias bibliográficas

- AccuWeather. (2018). *Temperaturas de Huehuetenango*. Huehuetenango.
- Arreola, J. P. (2015). Biofortificación con micronutrientes en cultivos agrícolas y su impacto en la nutrición y salud humana. *Tecnociencia*, *Tecnociencia*.
- Balzarini, M. G. (2013). *Análisis de ensayos agrícolas multi-ambientales. Estadística Biometría. Facultad de Ciencias Agropecuaria. Universidad de Córdoba. Argentina.*
- Chaveco, O. P. (2005). Biofortificación del frijol común con hierro y zinc: una alternativa en la estrategia de diversificación alimentaria en Cuba. *Agrosalud. Cali, Colombia.*
- CIAT. (1991). *Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Aart van Schoonhoven y Marcial A. Pastor Corrales (comps.)*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Di Rienzo, J. A. (2009). *Modelos Mixtos en InfoStat*. Tolima, Colombia.
- Gonzales, M. (2016). *Identificación de puntos críticos y temas para la formulación de proyectos de investigación en la Agro-cadena de frijol, Occidente. Guatemala.*
- Grandy, G. W. (2010). Deficiencia de hierro y zinc en niños. *Scielo, Revista de la Sociedad Boliviana de Pediatría*, 49(1). Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/pdf/rbp/v49n1/a05.pdf>
- Gurvlnder, S., & Gupta, S. K. (2019). Role of temperature, relative humidity and rainfall in the development of French bean rust (*Uromyces appendiculatus*). *Indian Phytopathology*, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s42360-019-00133-w>
- HarvestPlus. (2009). *Protocolos de Muestreo en Cultivos para Análisis de Micronutrientes*. James Stangoulis y Cristina Sison, Editores.
- HarvestPlus. (2014). *Biofortification Progress Briefs*.
- Hernández, J. &. (2006). Estudio sobre la adopción de variedades mejoradas de frijol en las principales zonas productoras de frijol de la región brunca de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 17(3), 357-367.
- Howarth, E. B. (2010). Biofortification a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *CropScience*, 50(Supplement_1), S-21. doi:10.2135/cropsci2009.09.0531
- IARNA. (2006). *Estado del uso de la tierra y ordenamiento territorial en Guatemala*. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Guatemala.

- ICTA. (2010). *Manual Técnico Agrícola, Produccion comercial y de semilla de Frijol (Phaseolus Vulgaris L)*. Instituto de Ciencias y Tecnología Agrícolas, Quetzaltenango, Guatemala.
- ICTA. (2017). *Informe final de resultados programa de frijol*. Quetzaltenango, Guatemala.
- ICTA-CIALO. (2015). *Evaluación de cultivares de frijol arbustivos (Phaseolus vulgaris L), con alto contenido de minerales en el altiplano occidental de Guatemala*. Guatemala.
- López, E. T. (2015). Rendimiento y estabilidad de líneas mejoradas de frijol negro en Veracruz y Chiapas, México. *Fitotec. Mex.*, 38 (2), 173-181.
- MAGA/DIPLAN. (2014). *Informe Situacion del Frijol, Direccion de Planeamiento*. Guatemala. Guatemala.
- Mayer, J. (2008). Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition, Current opinion in plant biology. *Elsevier*, .(11(2):166-170). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.01.007>
- McKean, S. J. (1993). Manual de análisis de suelos y tejido vegetal.
- Mederos, Y. (2006). Indicadores de la calidad en el grano de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*). *redalyc.org*, 55-62. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215825009>
- Mohammed, A. (2013). An Overview of Distribution Biology and the Management of Common Bean Anthracnose. *J. Plant Pathol Microb*, 6. DOI. 10.4172/2157-7471.1000193
- SESAN, MINEDUC & INE. (2018). *Cuarto censo nacional de talla, en escolares del primer grado de educación primaria del sector público*. Guatemala.
- Tofiño, A. P. (Septiembre-Diciembre de 2016). Rendimiento, estabilidad fenotípica y contenido de micronutrientes de frijol biofortificado en el Caribe seco Colombiano. *Corpoica.Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 309-329. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449946663001>



CRIA

Programa de consorcios de Investigación Agropecuaria

