Capítulo II

Generalidades del mejoramiento genético para las condiciones del Caribe seco

La planta de frijol es autógama, lo que significa que se autofecuanda; cuando una flor de frijol se abre, ya está fecundada por el polen de sí misma, pues la flor posee ambas estructuras reproductivas que se desarrollan de forma simultánea. Por esto, los programas de mejoramiento de frijol que incluyen ampliación de la diversidad existente en rasgos de interés implican la selección de parentales con características deseables, que se establecen en jardines de cruzamiento. El cruzamiento se realiza de modo dirigido y requiere la polinización manual de más de 10.000 flores para obtener la semilla necesaria y así establecer los lotes F1 o plantas híbridas (Checa Coral, Yama Escobar, & Fuel Tobar, 2011).

Los programas de mejoramiento que incluyen hibridación necesitan evaluación y selección de la progenie derivada de cada cruce simple, doble o triple, según sea el esquema de selección empleado, y una vez elegidos los genotipos con los caracteres de interés intra e interfamilias, estos se cosechan individualmente y se verifica el mantenimiento de dichos rasgos, eliminando las plantas por fuera de tipo. Este proceso puede repetirse por dos o tres ciclos para la estabilización de caracteres deseables y eliminación de los rasgos no deseables. Además, es un proceso que se utiliza para el desarrollo de cultivares con resistencia múltiple, alto rendimiento, buena adaptación y aceptación comercial. La ampliación de la diversidad genética se obtiene hibridizando entre sí plantas de alto desempeño agronómico y otros rasgos de interés del germoplasma andino y mesoamericano. Los índices de selección permiten el mejoramiento simultáneo de varios caracteres y las pruebas multilocales facilitan la identificación de las condiciones agroecológicas idóneas para la expresión del potencial genético de los genotipos y su estabilidad a través de diferentes localidades (Rosas Sotomayor, Castro, & Flores, 2000).

En el caso de los genotipos de frijol biofortificado evaluados en el Cesar, la aplicación del índice de selección permitió la identificación de los genotipos por inscribir en pruebas de evaluación agronómica ante el ICA.

El índice de selección se calculó mediante la fórmula:

{(4X rendimiento + 3 × contenido nutricional) – w5 (tipo de grano)}

Lo que arrojó como resultado en los 35 genotipos lo siguiente: para lograr los valores referidos abajo se tomaron los datos de rendimiento y contenido nutricional y se estandarizaron; además, se calificó la semilla de acuerdo con su brillo, color, tamaño, forma, y se le asignaron

calificaciones entre 1 y 5, siendo 1 el mejor. De los 35 genotipos evaluados, solamente 10 presentaron resultados negativos después de la aplicación del índice de selección. Sin embargo, como se requerían máximo nueve para postular a pruebas de evaluación agronómica (PEA), se eliminó SMR13 por su alta incidencia de gorgojo (tabla 1).

Tabla 1. Selección de los nueves mejores genotipos de un grupo de 35 evaluados en el Caribe seco, según el índice de selección

Genotipos	Índice
SMB17	3,01
SMC14	1,92
SMN18	0,069
SMR4	5,41
SMR43	1,029
SMR39	1,23
RCB 591	1,02
SCR3	0,31
DOR390	5,41
SMR15	6,04

Fuente: Elaboración propia

Fairfield Smith (1936) fue quien sugirió el empleo de una función discriminante como una forma lógica y sistemática en la selección de líneas para mejorar simultáneamente varias características cuantitativas, y el objetivo principal del índice de selección era maximizar el promedio del valor genético de una población. En el caso de maíz para forraje, se han utilizado las variables altura de planta, altura de la mazorca y rendimiento de forraje verde (Tucuch-Cauich et al., 2011). En la evaluación de progenies de yuca del programa de mejoramiento de CIAT se utilizan las variables rendimiento de raíces frescas, contenido de materia seca en raíz y tipo de planta, para los índices de selección de genotipos en los campos de observación (Pérez Velásquez et al., 2010).

En la actualidad, se suman otros paradigmas a las necesidades de mejoramiento de frijol (rendimiento, calidad de semilla, tolerancia a plagas y enfermedades). Las eventuales consecuencias del cambio climático han generado presión a Gobiernos, fitomejoradores, productores y consumidores para implementar planes de seguridad alimentaria. A lo anterior se suma el crecimiento exponencial de la población mundial y la problemática de distribución de alimentos, que han ocasionado deficiencia de hierro y otros micronutrientes a casi tres billones de personas a nivel global (Beebe et al., 2011). Este panorama, abre una nueva opción para los alimentos nutracéuticos.

En los programas nacionales centroamericanos de frijol los métodos utilizados para la generación de variedades son la selección recurrente, la selección masal, el método de pedigrí modificado y la introducción. En la generación de variedades optimadas, el método de mejoramiento por introducción ha sido el más utilizado, pues ha permitido identificar genotipos sobresalientes que luego se han liberado como variedades mejoradas para el trópico (Villar Sánchez, Salinas, & Acosta-Gallegos, 2003).

El programa de mejoramiento de frijol del CIAT utiliza principalmente la selección recurrente recíproca para la generación de poblaciones de frijol que tienen como principales objetivos la tolerancia al calor y a la biofortificación (Polanía, Rao, Beebe, & García, 2009). Producto de ese programa fueron los 35 genotipos de frijol biofortificado en generación F5, que se enviaron a AGROSAVIA en 2008 para evaluar en Cesar (Tofiño-Rivera et al., 2011).

En las últimas fases del proceso de mejoramiento es necesario valorar las líneas candidatas a nuevas variedades en una amplia gama de condiciones ambientales, para identificar las de alta productividad y estabilidad, de características agronómicas superiores. No obstante, para valorar lo anterior es importante tener en cuenta que la respuesta de los genotipos dependerá de las condiciones ambientales específicas donde se produzcan, lo que generaría diferencias de comportamiento entre genotipos en relación con la estabilidad de su producción. Estas diferencias se deben a la interacción genotipo x ambiente (Furtado Ferreira, Borges Demétrio, Manly, De Almeida Machado, & Vencovsky, 2006), la cual determina en gran medida, a través de su estudio, los genotipos por ser seleccionados para promoverlos como nuevas variedades.

Existen diferentes herramientas para el análisis de estabilidad de los genotipos que han utilizado de forma más eficiente el estudio que permite describir e interpretar mejor los efectos de la interacción G × A. Una de las herramientas más comunes para evaluar genotipos y ambientes es el modelo descrito por Eberhart & Russell (1966), que se ha combinado con modelos como el AMMI (modelo con efectos principales aditivos y de interacción), el cual combina el análisis de los efectos de la interacción multiplicativa y el de los efectos aditivos (Gauch & Zobel, 1996) y el BIPLOT que ayuda a optimizar la manera como se interpreta la interacción de forma más descriptiva. El mejor entendimiento de la interacción genotipo-ambiente y la mayor precisión en la estimación del rendimiento de grano y de la reacción a las enfermedades hacen de estos modelos herramientas útiles en los programas de mejoramiento genético (Cubero & Flores, 1994; Fikere, Tadesse, & Letta, 2008; Gauch, 2006; Lorenzo et al., 2003; Tamoc, Ustum, Altinok, & Acikgoz, 2009).

En algunos trabajos se ha comparado el AMMI con otras metodologías UNI o multivariadas para probar su eficiencia en la detección de germoplasma estable y diseccionar la interacción con el ambiente de prueba en frijol y otros cultivos (Fikere et al., 2008; Santos Pereira et al., 2009; Tamoc et al., 2009; Williams-Alanís et al., 2009). AMMI permite detectar diferencias entre ambientes, genotipos e interacción de ambos factores (López Salinas et al., 2011). Durante 2009 y 2010 se evaluaron en seis municipios del Cesar 35 genotipos élite entregados por el CIAT a

AGROSAVIA, por su potencial nutracéutico y productivo en la Serranía del Perijá y en la Sierra Nevada de Santa Marta, en la franja altitudinal entre 700-1.300 m s. n. m. Como resultado se seleccionaron nueve genotipos de frijol biofortificado rojos, negros, cremas y moteados, que se inscribieron a PEA en la subregión natural del Caribe seco colombiano (Tofiño-Rivera et al., 2011), con el fin de lograr la inscripción en el Registro Nacional de Cultivares comerciales del ICA de al menos una variedad de frijol biofortificado, como alternativa de mejoramiento de la competitividad de la cadena de frijol en esta subregión.

Para el desarrollo de la evaluación de múltiples localidades del Caribe seco, se sometieron a análisis de varianza de correspondencia múltiple los datos de las variables morfoagronómicas (días a floración, días a madurez fisiológica, días a cosecha, altura de planta, altura de inserción de la primera vaina, longitud de la vaina y diámetro de la vaina) de 10 cultivares (incluido testigo) de frijol en cuatro localidades (ambientes). En el análisis de correspondencia múltiple se tiene en cuenta el efecto de la localidad, el año, los genotipos, las repeticiones y el error sobre la variabilidad general del ensayo. Esto permite diferenciar el efecto genético del resultado respecto al efecto de promoción o limitación que ejerce la oferta bioclimática sobre el comportamiento de cada genotipo.

Por ejemplo, se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) para el efecto de ambientes, genotipos e interacción genotipo-ambiente en las variables días a floración y días a madurez fisiológica. Esto significa que los materiales evaluados se distinguieron entre sí y el testigo local en estos rasgos, pues son altamente cambiables en el germoplasma valorado y además son afectados por las condiciones ambientales, especialmente por diferencias en temperatura y nubosidad durante su cultivo. Por su parte, la variable días a cosecha solo mostró diferencias para los efectos genotipo y genotipo-ambiente; el primero no fue significativo, lo que sugiere que no es afectado por las condiciones ambientales predominantes, pero sí por la condición genética de los materiales de frijol evaluados. Las variables altura de planta, longitud y diámetro de la vaina presentaron diferencias altamente significativas para el efecto ambiente y genotipo; sin embargo, no existió interacción entre estos efectos. Por otro lado, la altura de inserción de la primera vaina solo presentó diferencias altamente significativas para el efecto de genotipos. Es decir, este rasgo dependió solo de la condición genética del carácter, pues los genotipos con baja inserción la conservarán independientemente del sitio donde se siembren (tablas 2 y 3).

En cuanto a la variable altura de inserción de la primera vaina, el testigo (11,47 cm) y los genotipos SMC14 (9,19 cm) y DOR390 (11,06 cm) presentaron la menor altura respecto a los demás genotipos de frijol biofortificados; los genotipos que se destacan por tener una mayor altura de inserción de la primera vaina son SMN18 (19,66 cm) y SCR3 (18,50 cm). En cuanto al diámetro de vaina, con excepción del genotipo SMN18 (2,77 cm), todos los demás genotipos presentaron valores más bajos que los que mostró el testigo (2,72 cm) (tabla 2). Las variables longitud y diámetro de la vaina mostraron diferencias significativas entre las localidades,

siendo Pueblo Bello el que muestra los menores promedios. Esto podría estar relacionado con la menor disponibilidad de cationes debido a la acidez, como calcio, potasio y Zn, fundamentales para la formación y el desarrollo de las vainas (García-Esteva, Kohashi-Shibata, Baca-Castillo, & Escalante-Estrada, 2003).

La arquitectura del grupo de frijol evaluado en el Cesar es de tipo erecta; no obstante, presentan diferencias en el hábito, es decir, en la clase de estructura vegetativa o reproductiva donde terminan el tallo principal y las ramas laterales, mientras que en el hábito I, que presentan el testigo regional y SMN18, termina en inflorescencia (determinado); el resto de los genotipos muestra hábito arbustivo tipo II, indeterminado. Dentro del tipo IIa, los genotipos SMR39 (variedad registrada Corpoica Rojo 39) y RCB591 exhiben tallos y ramas erectas pero débiles, sin guías apreciables. Los genotipos restantes son del tipo IIb, que a diferencia de los anteriores desarrolla guías apreciables. Así, se han establecido posibles interrelaciones entre hábito de crecimiento, tamaño de la semilla, madurez, centro de origen de domesticación y rendimiento en frijol común; empero, se ha determinado, a partir de estudios genéticos, que las diferencias en rendimiento entre los tipos de planta I y II son atribuibles a diferencias en el número de nudos en el tallo principal y longitud de las guías.

Estas variables, además de la habilidad trepadora y altura de planta, explican las diferencias altamente significativas en rendimiento entre los tipos de frijol determinados y los trepadores. Esto se evidencia en la heredabilidad del rendimiento en los cruces entre plantas de hábito IV y las de hábito I y II. Aparentemente, un control genético simple en la modificación de un tipo arbustivo a semitrepador y trepador explica el incremento del rendimiento entre esos cruces (Kornegay White, & Ortis de la Cruz, 1992).

También se ha definido que los genotipos de frijol de semilla pequeña rinden más que las plantas de semillas grandes. Con respecto a las variables productivas, el rendimiento se correlaciona de manera positiva con vainas/m^2, semillas/vaina, y en cuanto a las variables morfológicas, con todos los rasgos de la arquitectura de planta excepto ramificaciones/planta. En contraste, el tamaño de semilla se correlacionó negativamente con rendimiento, nudos/ramas, nudos/planta y nudos en el tallo principal, y positivamente con longitud entre nudos del tallo principal y su longitud. Las correlaciones genéticas entre rasgos sugieren que la selección para el incremento en la longitud de los entrenudos del tallo y la longitud del tallo principal podrían incrementar tanto el rendimiento, como el peso de semillas; aunque el tipo de planta resultante no es el ideal para el monocultivo de frijol, debido al hábito postrado (Nienhuis & Singh, 1986).

Tabla 2. Análisis de varianza combinado y comparación de las medias de las variables agronómicas para los genotipos de frijol biofortificado

Fuente de variación	Grados de libertad	Días flor	Días madurez fisiológica	Días cosecha	Altura inserción vaina	Altura planta	Longitud vaina	Diámetro vaina
Ambiente (A)	3	1.038,70**	732,90**	1676,10 ns	1,35	308,43*	8,99**	0,12**
Repetición /A	3	0,90 ns	0,13 ns	53,90 ns	6,14	224,83	2,05	0.003
Genotipo (G)	9	135,12**	113,40**	280,00 **	172,54**	4830,7**	6,15**	0,249**
Ax G	27	18,32**	19,20**	37,59**	1,75	152,59	0,88	0,003
Error	117	0,35	3,10	12,60	2,99	96,55	0,79	0,0037
cv (%)		1,66	2,65	4,52	12,46	14,80	7,99	2,38

*, ** = niveles de significancia al 0,05 y 0,01, respectivamente; ns = no significativo, cv = coeficiente de variación.
Fuente: Corpoica (2015)

Tabla 3. Comparación de medias de variables morfoagronómicas en germoplasma de frijol biofortificado evaluado en el Caribe seco

Genotipo	Días floración	Días madurez fisiológica	Días a cosecha	Altura inserción vaina	Altura planta	Longitud vaina	Diámetro vaina
SMR43	35,25(b)	65,00(b)	76,38(bc)	12,91(cd)	73,09bc	11,07abc	2,45(e)
SMN18	34,50(b)	63,25(b)	74,13(c)	19,66(a)	43,56e	10,83abc	2,77(a)
SMC14	35,25(b)	66,13(b)	80,56(abc)	9,19(f)	88,94a	10,53bc	2,50(de)
SMR4	35,00(b)	67,81(ab)	78,75(bc)	13,03(cd)	72,86bc	11,14abc	2,46(e)
SMB17	35,25(b)	65,94(b)	81,44(abc)	13,06(cd)	79,21ab	11,65ab	2,43(e)
SMR39	34,00(b)	63,25(b)	75,06(c)	13,99(c)	57,06d	11,87a	2,70(b)
RCB591	33,50(b)	67,19(ab)	76,38(bc)	15,94(b)	67,70cd	11,88a	2,55(cd)
DOR390	36,75(b)	68,25(ab)	82,63(ab)	11,06(e)	84,44a	10,73bc	2,46(e)
SCR3	33,75(b)	65,19(b)	74,94(c)	18,50(a)	62,09cd	11,62ab	2,59(c)
Testigo	43,50(a)	72,25(a)	87,19(a)	11,47(de)	34,72e	10,02c	2,72(ab)
Promedio	35,68	66,43	78,74	13,88	66,36	11,14	2,56
dms	5,20	5,33	7,45	1,61	11,22	1,01	0,0699

Nota: el genotipo SMR39 se registró como frijol biofortificado Corpoica Rojo 39. Los genotipos con letra diferente implican diferencias significativas.
Fuente: Elaboración propia

El rendimiento del grano de diferentes cultivares de frijol no está asociado intrínsecamente con vigor vegetativo al momento de la floración, mientras que los mecanismos durante el llenado de vainas pueden influenciar fuertemente el rendimiento final del cultivo. El establecimiento de un sistema radical profuso durante el llenado de vainas, asociado a la adquisición continua de nitrógeno y fósforo durante el inicio del cuajado de vainas, tiene efectos relevantes en el rendimiento. El rendimiento del grano se correlaciona con biomasa del brote durante el llenado de vaina y biomasa de raíz en cuajado de vaina (Araujo & Grandi Teixeira, 2008). En la tabla 3 se presentan los resultados del análisis de varianza para rendimiento y sus componentes, evaluados en diez cultivares de frijol en cuatro localidades (ambientes). Se detectaron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) en todas las variables de rendimiento evaluadas para los efectos de localidad y genotipo. Asimismo, para el efecto de interacción genotipo x ambiente el análisis de varianza permitió detectar diferencias estadísticas altamente significativas, lo que sugiere que las variables relacionadas al rendimiento, y este último en sí, están influenciadas por las condiciones ambientales en las cuales se desarrollan los genotipos de frijol.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (Anova factorial), en la variable vainas por planta, los datos evidencian interacción significativa para los efectos genotipo, localidad, ambiente y genotipo-ambiente, aunque este último es menos marcado porque en la descomposición de la varianza el efecto genotípico alcanza el 72,62 % de la varianza total. Lo anterior indica que, para las condiciones del estudio y genotipos incluidos, el número de vainas por planta depende más del efecto genético que de la interacción con el ambiente. Esta tendencia es similar a lo que muestra la variable peso de 1.000 semillas, cuya dependencia del efecto de genotipos alcanza un 69,96 %, y aunque la interacción con el ambiente es positiva su contribución es baja. De igual forma, en el caso del rendimiento de grano, se muestra la fuerte dependencia de los genotipos en la explicación de la variabilidad extraída, que alcanza el 61 %, del cual solo el 17 % corresponde a la interacción con el ambiente. Lo anterior evidencia la necesidad de tener en cuenta dicho efecto ya que, aunque con porcentajes menores, tiene influencia en el comportamiento de los cultivares. De modo contrario a lo evidenciado en las tres variables anteriores, en número de semillas por vaina la descomposición de los efectos de la variable muestra una interacción más fuerte con el ambiente, que alcanza el 38,98 % de la variación total (tabla 4).

Tabla 4. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado y comparación de las medias para rendimiento y sus componentes para genotipos de frijol biofortificado

Fuente de variación	G.L.	Cuadrados medios			
		Semilla t ha^{-1}	Vainas/planta	Semilla/vaina	Peso/1000 semillas
Localidad	3	893.867,36**	142,6**	2,06919**	10.473,5**
Repetición	3	107.729,1 ns	53,5**	0,0852 ns	212,226 ns
Genotipo (G)	9	866.152,1**	310,6**	0,44892**	18.729,9**
A × G	27	80.953,7**	23,2*	0,24166**	1.516,1**
Error	117	37.471,98	13,34	0,05580	180,15
cv (%)		12,53	15,89	4,209	5,07

*, ** = Niveles de significancia al 0,05 y 0,01, respectivamente. ns = no significativo, cv = coeficiente de variación.
Fuente: Elaboración propia, a partir de información de la prueba de evaluación agronómica hecha en cuatro ambientes de la subregión natural de Caribe seco

En general, los resultados de las variables de producción de frijol demuestran que los genotipos evaluados tienen un comportamiento diferencial en los ambientes probados. El grupo de genotipos de frijol biofortificado superó estadísticamente al testigo regional en rendimiento de semilla (tabla 5 y figura 2) (Tofiño-Rivera, Melo-Ríos et al., 2016).

Tabla 5. Comparación de medias según Dunnet del rendimiento y sus componentes en germoplasma de frijol biofortificado evaluado en el Caribe seco

Comparación / variable	Rendimiento de semilla (kg ha^{-1})		Vainas/planta		Semilla/vaina		Peso/1000 semillas	
	Diferencia entre medias	Significancia (α = 0,05)	Diferencia entre medias	Significancia (α = 0,05)	Diferencia entre medias	Significancia. (α = 0,05)	Diferencia entre medias	Significancia. (α = 0,05)
SCR3 – testigo	782,11	*	6,986	*	0,3606	*	93,25	*
SMR4 – testigo	697,29	*	12,528	*	0,3150	*	20,98	*
SMR39 – testigo	476,34	*	3,121	ns	0,3531	*	77,02	*
SMR43 – testigo	398,23	*	4,616	*	0,2475	*	41,53	*
RCB591 – testigo	504,95	*	3,518	ns	0,3775	*	78,27	*
DOR390 – testigo	602,18	*	13,370	*	0,4675	*	-9,31	ns
SMN18 – testigo	447,76	*	6,545	*	-0.0406	ns	45,14	*
SMB17 – testigo	192,83	*	2,210	ns	0,1500	ns	20,04	*
SMC14 – testigo	596,64	*	9,198	*	0,3219	*	33,30	*
Valor T-Dunnett				2,7281				
dms	186,71		3,5233		0,2278		12,946	

Nota: nivel de confianza 5 %; ns = no significativa; *** = diferencia estadística significativa.
Fuente: Elaboración propia

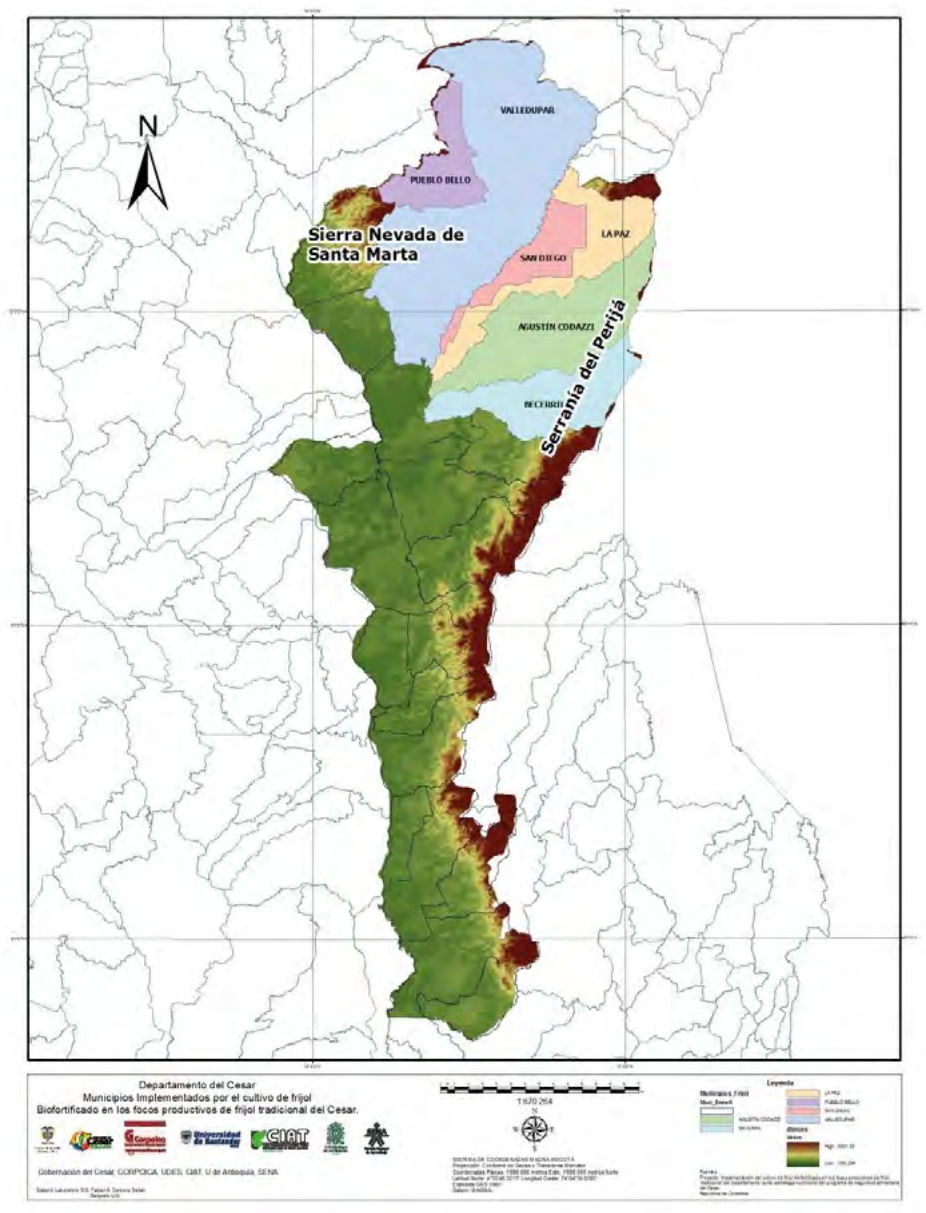

Figura 2. Zonas de evaluación de germoplasma de frijoles biofortificados en el departamento del Cesar.
Fuente: Corpoica (2012)

En la subregión natural Caribe seco el genotipo SCR3 presentó los mayores rendimientos con 1,45 t/ha. Al descomponer las variables que explican el rendimiento de semilla de frijol, se observa que el genotipo DOR390 mostró la diferencia más amplia del número de vainas por planta respecto al testigo (13,37), mientras que en el peso de 1.000 semillas este genotipo tuvo una diferencia negativa respecto al testigo (-9,31). Esto sugiere que la semilla de este genotipo registra un peso menor a la semilla que el testigo; la diferencia más amplia de esta última variable la marcó el genotipo SCR3 (93,25). En cuanto a la variable rendimiento de semilla (kg/ha^{-1}), todos los genotipos evaluados superaron al testigo ($\alpha = 0,05$) en un rango de 192,83 kg/ha^{-1} (SMB17) y 782,11 kg/ha^{-1} (SCR3) (tabla 5) (Tofiño-Rivera, Melo-Ríos et al., 2016).

Lo anterior sugiere que el componente de rendimiento más discriminante en esta subregión para el grupo de biofortificados y el testigo fue número de vainas por planta. La importancia de esta variable para la determinación del rendimiento es consistente con lo referido en el análisis de correlación y de sendero de los componentes del rendimiento, realizado en frijoles tipo bola roja y reventón (López & Ligarreto, 2006). En este sentido, se ha demostrado que la variabilidad en peso de semilla y rendimiento es causa, principalmente, de los efectos ambientales (López, Becerra, Cano, Zaleta, & Acosta, 1996).

En otras zonas del país como Nariño se realizaron evaluaciones multilocales en clima medio utilizando germoplasma de frijol arbustivo, las cuales fueron analizadas por ANOVA y AMMI en un rango altitudinal de 1.800-2.200 m s. n. m. De esta manera, se encontraron muy pocas diferencias entre el nuevo germoplasma y el testigo local, a diferencia de lo observado en este estudio. También es relevante mencionar que el desempeño agronómico observado fue menor, dado que la media general de rendimiento en esa zona fue de 0,84 t/ha^{-1}, cifra que está por debajo del promedio nacional (1,23 t/ha) (MADR, 2016); mientras que en el Caribe seco la media del ensayo fue de 1,45 t/ha^{-1} (Checa et al., 2011). En evaluaciones con frijol caupí arbustivo (*Vigna unguiculata*), conducentes a liberación y realizadas en cuatro localidades del Caribe húmedo, los rendimientos fueron similares a los de Nariño (0,8 t/ha^{-1}) durante dos semestres de cosecha, excepto en la localidad de Montería, en el segundo semestre de evaluación; en ese periodo se alcanzó un promedio de rendimiento del ensayo similar al de los biofortificados en el Caribe seco: 1,45 t/ha^{-1} (Araméndiz Tatis, Espitia Camacho, M., & Cardona ayala, 2017).

Lo anterior indica el potencial productivo de los frijoles biofortificados arbustivos de germoplasma mesoamericano respecto a otros cultivares locales y mejorados. Por ejemplo, las variedades ICA Quimbaya produce en promedio 1.400 kg/ha^{-1} (Ríos et al., 1993); Corpoica Radical Jiji, 1.300 kg/ha^{-1} y Corpoica Froilán, 1.500 kg/ha^{-1}, de modo similar a los biofortificados, pero a mayores alturas (1200-1900 m s. n. m.) y con ciclos productivos más largos (iguales o superiores a los 90 días) (León Moreno & Jiménez Arango, 2002; León Moreno, Moreno Quintero, & Fuentes Cárdenas, 1998). Por su parte, los biofortificados se establecieron

en localidades entre 600-1.300 m s. n. m. del Caribe seco y con mayor precocidad, con 75 días en promedio (Tofiño-Rivera, Melo-Ríos et al., 2016).

Al revisar los componentes de rendimiento en evaluaciones multilocales que se hicieron en programas de mejoramiento del país en Nariño, Caribe húmedo y Caribe seco se encontró que en los germoplasmas de frijol caupí los biofortificados presentaron diferencias significativas en número de semillas por vaina, peso de 100 semillas y rendimiento. Esto indica que al menos un genotipo se diferencia del grupo o que al menos una localidad limita o promueve la productividad del germoplasma evaluado. Mientras tanto, en Nariño solo se presentaron diferencias significativas en peso de 100 semillas (Araméndiz Tatis et al., 2017; Checa et al., 2011; Tofiño-Rivera, Melo-Ríos et al., 2016).

Los resultados a nivel de componentes de rendimiento también fueron divergentes, y se mostró una mayor variabilidad en los caracteres evaluados en Caribe seco en comparación con el germoplasma de Nariño. En general, el germoplasma no logró diferenciarse respecto al testigo, excepto en uno de los tres componentes. Respecto a los componentes del rendimiento de frijol arbustivo en clima medio en Nariño, se encontró que la variable número de vainas por planta presentó poca variabilidad en el ensayo; de tal modo que los genotipos evaluados no lograron superar de manera significativa al testigo, que alcanzó una media general multilocal de 8,35. Esta baja variabilidad en el germoplasma también se encontró en número de granos por vaina que, a pesar de exhibir mayor variación, mantiene al testigo (3,75) dentro del grupo de mejor comportamiento. Solo en la variable peso de semillas, el germoplasma evaluado superó estadísticamente al testigo de semilla mediana (31,76), en especial el genotipo chocho, que alcanzó semilla grande (42,18) (Checa et al., 2011).

Por otro lado, el germoplasma de los frijoles biofortificados mostró una mayor consistencia en su comportamiento agronómico (0,9-1,785 kg/ha^{-1}), respecto a lo evidenciado en frijol caupí, que, aunque ostentó un número superior de semillas por vaina (10,6 a 13,5) debido al bajo peso de 100 semillas (de 10,6 a 20 g), alcanzó un rendimiento promedio menor (683 y 1425 kg/ha^{-1}) (Araméndiz Tatis et al., 2017).

En la figura 3 se muestra la estabilidad de los genotipos y se puede notar la separación entre localidades. En este caso, los genotipos más estables en el comportamiento de sus rendimientos fueron DOR390 y SMC14, que a su vez coinciden con los de mayor promedio, seguido de SMR39 que, aunque no tiene la media alta, es estable en los ambientes señalados. En este sentido, es de esperarse que el genotipo DOR390 presente estas características de estabilidad, alto rendimiento y buenas características agronómicas, pues en 1994 se ofreció a los productores del trópico húmedo de México con el nombre de negro tacaná (López et al., 1996). Lo anterior refleja la validez del análisis y la eficiencia de los biofortificados SMR39 y SMC14, al evidenciar características productivas similares a una variedad comercial. Sin embargo, en el caso del mercado en el Caribe seco, los frijoles negros y cremas no tienen aceptación comercial, por lo cual solo los tipos rojos brillantes y rojos moteados tienen demanda para el

consumo como grano seco (Tofiño-Rivera et al., 2011). Por otro lado, el genotipo SCR3, con excelentes rendimientos en Manaure, Valledupar y Pueblo Bello, y características nutricionales superiores, tiene problemas de volcamiento; por lo cual requeriría un proceso adicional de selección por planta individual para tratar de eliminar ese rasgo indeseable. Además, dado que su calidad de grano presenta tiempo de cocción alto, se recomendaría para su explotación agroindustrial (Tofiño-Rivera, Melo-Ríos et al., 2016).

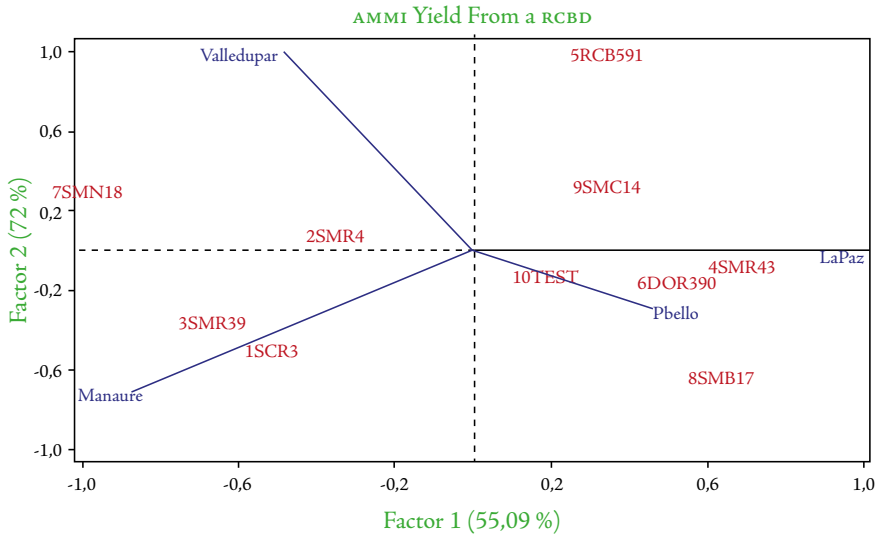

Figura 3. Análisis AMMI. Resultados de evaluación multilocal de frijoles biofortificados en la región natural del Caribe seco.
Fuente: Elaboración propia

El análisis ammi permitió identificar localidades de Nariño que maximizan la expresión del germoplasma, como Sandoná, y localidades que limitan la expresión, como Bomboná. También ayudó a identificar de qué manera en el Caribe seco genotipos adaptables y estables, como el testigo y AFR735, se mostraron adaptables y estables, pero con productividad por debajo del promedio general. Aunque los genotipos A36, AFR298, AND277, CHOCHO, PVA773 y Radical Cerinza fueron adaptables, tuvieron comportamiento impredecible; G5708 con una media de 838,5 kg/ha^{-1} mostró mejor desempeño en ambientes favorables, aunque inestable, mientras que BRB181 se desempeñó mejor en ambientes desfavorables y fue estable (Checa et al., 2011).