

FACTORES DE PRODUCCIÓN QUE INFLUYEN EN LA RESPUESTA DE GENOTIPOS DE *Coffea arabica* L. BAJO DIVERSAS CONDICIONES AMBIENTALES DE COLOMBIA

Juan Carlos García López*; Húver Elías Posada Suárez**; Fredy Antonio Salazar Villareal***

GARCÍA L., J.C.; POSADA S., H.E.; SALAZAR V., F.A. Factores de producción que influyen en la respuesta de genotipos de *Coffea arabica* L. bajo diversas condiciones ambientales de Colombia. Revista Cenicafé 66 (2): 30-57. 2015

Con el objetivo de establecer la capacidad de diferenciación de respuestas genotípicas de las estaciones experimentales (EE) de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y determinar las condiciones climáticas que definen estas respuestas, un grupo de genotipos, todos originados en una preselección con reconocimiento de atributos agronómicos y de resistencia a enfermedades, fueron evaluados en dos investigaciones, en nueve EE, entre enero de 2000 y diciembre de 2009. Se registró la producción por pase y se acumuló por mes, semestre y año. Se tomó la información diaria de precipitación, brillo solar, temperaturas media, mínima y máxima, y se construyeron los índices de déficit de humedad del suelo moderado y fuerte, déficit de brillo solar, tiempo térmico y amplitud térmica, que junto con la precipitación y el brillo solar, se combinaron con cuatro etapas fisiológicas del cultivo, para conformar 28 indicadores bioclimáticos. La producción se evaluó con estadística univariada, multivariada y de regresión, que incluyeron análisis combinados y regresión PLS, este último incorporó los indicadores bioclimáticos. El análisis PLS explicó en sus primeros dos factores entre el 51% y 56% de la interacción Genotipo x Ambiente. A partir de las respuestas diferenciales de los genotipos evaluados, se conformaron siete grupos ambientales. Los rangos de la producción potencial estuvieron relacionados con los eventos de El Niño, La Niña y Neutro, los cuales influyeron en el desempeño de los genotipos, con diferentes grados de adaptación.

Palabras clave: Interacción genotipo por ambiente (GxE), indicadores bioclimáticos, cuadrados mínimos parciales (PLS), respuestas fenotípicas.

PRODUCTION FACTORS THAT INFLUENCE THE RESPONSE OF *Coffea arabica* L. GENOTYPES UNDER DIVERSE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF COLOMBIA

In order to establish the differentiation capacity of genotypic responses of the Experimental Stations (ES) of the National Federation of Coffee Growers of Colombia and to determine the climatic conditions that define such responses, a group of genotypes, all originated from a preselection with appreciation of agronomic and disease resistance attributes, were evaluated in two studies in nine ES, between January 2000 and December 2009. Production per pass was recorded and accumulated by month, semester and year. Daily information on precipitation, sunshine, and average, minimum and maximum temperatures were taken and rates of moderate and strong soil moisture deficit, sunshine deficit, thermal time and thermal amplitude were built and, along with precipitation and sunshine, were combined with four physiological stages of cultivation to form 28 bioclimatic indicators. Production was assessed with univariate, multivariate and regression statistics, which included combined and PLS regression analyses, the latter considered bioclimatic indicators. In its first two factors, PLS analysis explained between 51% and 56% of the genotype by Environment interaction. From the differential responses of the assessed genotypes, seven environmental groups were formed. The ranges of potential production were related to events of El Niño, La Niña and Neutral, which influenced the performance of genotypes with different degrees of adaptation.

Keywords: Genotype by environment interaction (GxE), bioclimatic indicators, Partial Least Squares (PLS), phenotypic responses.

* Investigador Científico II, Disciplina de Fitotecnia, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

** Líder Nacional de Extensión. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia FNC.

*** Ph.D. Ciencias en énfasis en Fitomejoramiento. Cenicafé.

En la estrategia del Programa de Investigación Científica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC, la disciplina de Mejoramiento Genético ha liderado el desarrollo de nuevas variedades. Su mayor logro se constituye en haber obtenido una variedad con resistencia a un patógeno sin su presencia en nuestro país. Desde finales de los años ochenta, cuando se entregó la primera variedad con resistencia a la roya del cafeto, denominada Variedad Colombia, a la par con los avances tecnológicos, se continúa en la búsqueda de nuevos materiales que satisfagan las necesidades de un conjunto de actores en la cadena productiva, es así como en la actualidad, el reto de incorporar nuevos atributos a una variedad trascienden la frontera de lo meramente agronómico, pues no sólo es la investigación clásica *per se*, sino el entendimiento de la relación con todos los factores, los que contribuyen en su adaptación, como por ejemplo las condiciones ambientales que refleja un sitio en especial. En este último aspecto se fortalece la investigación, es así como grupos de los mejores materiales mejorados por sus atributos en calidad, tamaño de grano, productividad y resistencia a enfermedades, son evaluados en diferentes ambientes, con el fin de observar su comportamiento relativo y determinar su potencial de adaptabilidad y estabilidad, para luego candidatizarlos en las futuras mezclas de las diferentes progenies que constituyan una nueva variedad compuesta. Con este esquema, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, ha liberado en la última década ocho variedades, una de adaptación general y siete de adaptación específica (3).

Los objetivos de este estudio fueron establecer la capacidad de cada sitio experimental para la diferenciación de respuestas fenotípicas y determinar las

condiciones climáticas que definen las respuestas diferenciales en cada uno. Adicionalmente, separar los genotipos evaluados por su adaptabilidad específica.

La zona cafetera colombiana se localiza entre 1° y 11° de latitud Norte, y 72° a 78° de longitud Oeste, entre los 800 y 2.000 m de altitud, entre las tres cordilleras Andinas (Occidental, Central y Oriental, además del sistema montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta) (26). El área sembrada en café ha aumentado de 878 mil hectáreas en el 2008 a 945 mil hectáreas al 30 de abril del 2015 y se encuentra distribuida en 561 municipios de 22 de los 32 departamentos; en esta área se registran 553 mil productores y más de 686 mil fincas¹. El cultivo de café representa el 17% del PIB agrícola y 9% de todo el agropecuario. Cerca de 2,2 millones de personas dependen directamente del cultivo, lo que equivale al 25% de la población rural colombiana. La actividad cafetera genera 741 mil empleos directos y 1,4 millones de empleos indirectos, constituyendo así el 31% del empleo agrícola nacional (22).

En el año 2014, Colombia produjo 12,2 millones de sacos de café verde, el volumen de exportaciones de café colombiano fue de 11 millones de sacos y las exportaciones mundiales se situaron en 149,3 millones de sacos (23). En sus programas institucionales, la FNC se propone alcanzar la meta de un millón de hectáreas en café y de elevar la producción anual a 17 millones de sacos en el año 2020, con el fin de afianzar la participación en el mercado de los suaves (23).

Ambiente para el cultivo del café. Las diferencias en los factores geográficos determinan una alta diversidad en los elementos de clima, especialmente por cantidad y

¹ SIC@: Sistema de Información Cafetera-FNC. 2015.

distribución de lluvias, rango de temperatura día - noche, temperatura media, humedad relativa, horas de brillo solar y meses secos durante el año.

DaMatta *et al.* (19) realizaron una detallada revisión de los determinantes climáticos, ambientales y de crecimiento vegetativo y reproductivo del café. Se destacan las siguientes citas:

- La precipitación anual óptima fluctúa entre 1.200 y 1.800 mm y la temperatura media entre 18 y 21°C, por encima o por debajo de éstos se producen alteraciones en los patrones de crecimiento y producción. Otro factor que afecta la periodicidad de crecimiento corresponde a las fluctuaciones de la radiación solar.
- Los períodos secos y las primeras lluvias que le siguen a éstos determinan los patrones de floración; la carencia de períodos secos limita el cultivo en zonas de regiones tropicales.
- El cuajamiento del fruto se afecta por factores ambientales como la lluvia intensa, por la nutrición mineral y por caídas súbitas de temperatura. Por su parte, las mayores altitudes (temperaturas del aire más bajas) permiten una mejor expresión de calidad de la bebida.

De acuerdo con Jaramillo (32), en Colombia la temperatura óptima para el café se encuentra entre 18 y 22°C; por debajo o por encima de esta temperatura se disminuye la producción, debido principalmente a los trastornos florales. En cuanto a las necesidades de agua, éstas se calculan en 125 mm.mes⁻¹, sin embargo, la Deficiencia Hídrica Anual (DHA) de innumerables regiones cafeteras mundiales muestra que valores de DHA inferiores a 150 mm viabilizan el cultivo, y valores superiores

a éste, con límite de 200 mm, lo marginan o deberá recurrirse a riego (57). Las cuencas hidrográficas y la altura sobre el nivel del mar son determinantes en la demanda hídrica del cultivo de café en Colombia, las variaciones de los requerimientos estarán condicionadas por la capacidad de retención de humedad de los suelos y la edad del cultivo (51). Los períodos de deficiencia hídrica seguidos por lluvias inducen la antesis, la cual será mayor en la medida que el período de déficit sea más acentuado y prolongado. El fotoperíodo en café no es limitante, ya que durante todo el año el número de horas de luz es inferior a 12,5 h (4).

En Colombia, la zona de convergencia intertropical explica la existencia de dos épocas secas y dos húmedas en el año (26, 32, 59), las cuales determinan dos épocas de cosecha de café; con variaciones en los extremos Norte y Sur y la vertiente oriental de la cordillera Oriental, en los cuales la distribución monomodal de las lluvias hace que se concentre la cosecha (4, 26, 32, 59). La intensidad relativa de la estación seca (uno a dos meses), repercute en el ciclo de producción que presenta una variabilidad entre 215 y 240 días, a 5° y 11° de latitud Norte, respectivamente (58). Una relación entre los elementos meteorológicos y la fenología muestra que en el período de desarrollo de los botones florales (dos - tres meses antes de la florescencia), ocurre el predominio de verano, la alta radiación, la mayor amplitud térmica, la baja humedad relativa, el buen desarrollo de los vientos y las precipitaciones de poca intensidad. En el período de florescencia las temperaturas mínimas nocturnas son muy altas, aumenta la humedad relativa, la nubosidad y la lluvia. En la etapa de formación del fruto se recrudece la lluvia, aumenta la nubosidad, se reduce la radiación, se presentan oscilaciones de temperatura y humedad relativa, así como

lluvias fuertes de alta duración. La maduración del fruto coincide con el período de transición invierno-verano (59).

Montoya *et al.* (45) desarrollaron un modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia, plantean tres condiciones de los factores más importantes: los reductores (arvenses, plagas, enfermedades), los limitantes (agua, nutrientes) y los determinantes (climáticos, fisiológicos, genéticos y CO₂). Sobre esta base se definen niveles o situaciones de producción para estudiar los efectos de los factores determinantes y restrictivos, como los de superposición con los factores que reducen los rendimientos. En el nivel de producción 1, al que corresponde la producción potencial, el cultivo tiene los recursos suficientes y en la cantidad adecuada, encontrando que la tasa de crecimiento está determinada principalmente por la radiación solar absorbida. Teniendo en cuenta que un caficultor puede, en su proceso de administración, controlar aquellos factores reductores y limitantes para lograr una producción "alcanzable", es necesario que las condiciones climáticas de su entorno le permitan lograrlo.

De los factores ambientales, la disponibilidad de energía y agua juegan un papel importante en la producción. En una localidad y una época del año determinada, la cantidad de radiación que llega a la superficie sufre modificaciones por efecto de la nubosidad, la latitud, la altitud y la orientación de las laderas. Por su parte, la temperatura juega un papel importante en el crecimiento del café, sus extremos (13°C, inferior y 32°C, superior) anulan el proceso de crecimiento y producción (4).

Índices bioclimáticos de uso en café. La Tabla 1 presenta referencias de investigaciones

en café, relacionadas con los eventos de floración y cosecha (período reproductivo), las cuales han involucrado índices bioclimáticos.

En varios estudios desarrollados en Brasil, el empleo de indicadores ha permitido en café, estimar la duración de diferentes períodos fenológicos (17, 47, 48), desarrollar modelos agrometeorológicos para la estimación de la productividad (14, 55), construir zonificaciones agroclimáticas para delimitar áreas homogéneas en su comportamiento y definir sus limitaciones, aptitudes y riesgos (43, 57) y diseñar sistemas de alertas de heladas (16). En Colombia, la construcción de algunos índices ha permitido definir su relación con algunos períodos fisiológicos como la floración (15, 50), desarrollo del fruto (6) y siembra a cosecha (37) y establecer criterios para planificación del cultivo (7, 34, 39), entre otros.

Selección de variedades en función de la oferta ambiental. Puede hablarse de adaptación en el contexto de la variación espacial de la expresión de un genotipo y de estabilidad para la variación en un lugar dado, a través de los años o bajo distintas prácticas de cultivo (54). En un programa de mejoramiento se exploran, de manera permanente, los genotipos por sus condiciones de adaptabilidad y estabilidad. Sin embargo, dado que por efecto de la interacción con el ambiente, las variedades sembradas manifiestan una respuesta de desempeño relativo, puede ocurrir que ciertas condiciones ambientales y de manejo que son favorables para algunos, representen limitación para otros. En este sentido resulta importante comprender las circunstancias que determinan la respuesta diferencial, mediante herramientas que posibiliten evaluar la interacción, que ayuden al mejorador a la toma de decisiones de acuerdo con el objetivo del programa de mejoramiento.

Tabla 1. Índices bioclimáticos en café, con énfasis para el cultivo en Colombia.

Variable o período fenológico	Índice bioclimático	Valor	Referencia
Floración - Cosecha	Temperatura base inferior (°C)	10 - 12 10,2 - 10,5 10,5	Jaramillo y Guzmán (37) Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> , (47)
Siembra - 1ª. Floración	Grados Día (tiempo térmico)	3.250	Jaramillo y Guzmán (37)
Floración - Cosecha	Grados Día	2.761 - 2.887 2.733 - 3.008 2.500	Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> (47) Jaramillo y Guzmán (37)
Floración - Cosecha	Evapotranspiración real	689 mm 746 - 799 mm	Pezzopane <i>et al.</i> (48) Nunes <i>et al.</i> (47)
Floración	Delta térmico (amplitud térmica)	Días con menos de 10°C	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Fase de inducción y maduración de yemas florales	Evapotranspiración potencial acumulada	ETP ≈ 350 mm	Camargo y Camargo (13)
Floración - Cosecha	Índice de Humedad del Suelo (IHS) Moderado IHS Fuerte	0,6 < IHSM < 0,8 IHSF < 0,6	Arcila y Jaramillo (6)
Floración - Cosecha	Índice de Déficit Hídrico (IDH) Moderado	0,5 < IDHM < 0,8	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Floración - Cosecha	Índice de Déficit Hídrico (IDH) Fuerte	IDHF < 0,5	
Crecimiento	IHSF	IHSF < 0,5 IHSF < 0,4	Arcila y Jaramillo (6) Allen <i>et al.</i> (2)
Floración	Déficit de Brillo Solar (DBS) = N-n	Días con DBS < 7,2	Ramírez <i>et al.</i> (51)
Componentes del ciclo hidrológico	Lluvia efectiva, catetales a libre exposición	43,83 mm 39,4 47,8 mm 51-54 mm 761 mm	Jaramillo y Chaves (35) Jaramillo y Chaves (36) Velásquez y Jaramillo (66) Jaramillo (31) Pezzopane <i>et al.</i> (48)
	Evapotranspiración de referencia	4,66* e(0,0002*Alt) (cobertura nal.)	Jaramillo (30)
		4,37* e(0,0002*Alt (cuencas))	Jaramillo (33)
Un año de desarrollo del cultivo	Deficiencia hídrica anual	< 150 mm apta sin riego > 150 mm apta con riego	Silva <i>et al.</i> (57)
Relación entre radiación solar y brillo solar	Coeeficientes de Angstrom	a - 0,246-0,278 b - 0,462-0,549	Gómez y Guzmán (27)

Diferencias en la tasa de aumento de la respuesta genotípica a un nivel sub-óptimo, reflejan cambios en la eficiencia; mientras que las diferencias en las tasas de rendimiento de la respuesta genotípica a un nivel súper-óptimo reflejan discrepancia en tolerancia (8). En general, un genotipo puede ser expresado como sigue, si la interacción genotipo por ambiente (GxE) no es importante o es ignorada: $F=G+E$, donde F significa fenotipo, G el genotipo y E el ambiente (68). La GxE se dice que ocurre cuando cultivares diferentes o genotipos responden de manera diferente a diversos ambientes (8, 60), o en otras palabras, corresponde a la alteración en el comportamiento relativo de los genotipos, en virtud de las diferencias del ambiente (12). La interacción GxE es importante sólo cuando causa cambios significantes en la clasificación de genotipos en distintos ambientes (8, 68). Las interacciones cualitativas complican la selección e identificación de los mejores genotipos; cuando no se cruzan, no es posible la recomendación para ambientes específicos (8). Para que la GxE sea detectada vía procedimientos estadísticos, debe haber al menos dos genotipos diferentes o cultivares evaluados en al menos dos ambientes contrastantes. El modelo básico que incluye la GxE es: $F=G+E+GE$, donde GE es la GxE (68).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales. En el presente trabajo se consideraron dos investigaciones de la disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafé, en las cuales grupos de genotipos originados en una preselección con reconocimiento de atributos agronómicos y de resistencia a enfermedades, progenies avanzadas originadas entre el cruce de la variedad Caturra por el Híbrido de Timor, candidatas a conformar variedades, fueron evaluados en nueve localidades representativas de la geografía cafetera colombiana (Tabla 2).

La genealogía de los diferentes genotipos en cada experimento se presenta en la Tabla 3. Como puede observarse, la mayor parte de los genotipos han sido generados de los mismos parentales.

Para el desarrollo de la investigación se obtuvieron los materiales partiendo de germinador, su etapa inicial de plántula hasta los seis meses se desarrolló en almácigo, la estructura del diseño y la siembra se describe a continuación:

El experimento A lo componen 39 genotipos y tres testigos, los cuales se sembraron en

Tabla 2. Ubicación geográfica de las Estaciones Experimentales donde se realizaron las evaluaciones de interacción genotipo por ambiente entre los años 2000 y 2009.

Estación Experimental	Departamento	Municipio	Altitud (m)	Latitud Norte	Longitud Oeste
Pueblo Bello	Cesar	Pueblo Bello	1.134	10° 25'	73° 34'
Santander	Santander	Floridablanca	1.539	7° 6'	73° 4'
El Rosario	Antioquia	Venecia	1.635	5° 58'	75° 42'
Naranjal	Caldas	Chinchiná	1.381	4° 58'	75° 39'
Santa Bárbara	Cundinamarca	Sasaima	1.478	4° 56'	74° 25'
La Trinidad	Tolima	Líbano	1.453	4° 54'	75° 2'
La Catalina	Risaralda	Pereira	1.321	4° 45'	75° 44'
Paraguacito	Quindío	Buenavista	1.203	4° 24'	75° 44'
El Tambo	Cauca	El Tambo	1.735	2° 24'	76° 44'

un diseño Látice incompleto 6x7, con tres repeticiones, cada surco de cada progenie lo constituyeron 12 plantas, de las cuales se evaluaron de forma individual las diez plantas centrales. La siembra de las plántulas se efectuó en cinco Estaciones Experimentales (EE), Naranjal, El Rosario, La Trinidad, Paraguaicito y Santa Bárbara, en octubre de 1997, a una distancia de 1,0 m entre plantas y 2,0 m entre surcos.

El esquema de siembra del experimento B siguió un mismo patrón en las siete EE donde fue evaluado (Naranjal, Paraguaicito, El Rosario, La Catalina, El Tambo, Santander y Pueblo Bello). Entre octubre y noviembre de 2004, las plántulas se sembraron a una distancia de 1,0 m entre plantas y 1,5 m entre surcos. Cada progenie se estableció en bloques de 36 árboles, dispuestos en tres surcos, con 12 plantas cada uno.

Las progenies en el campo se ubicaron de forma aleatoria y las evaluaciones fenotípicas se realizaron en las 10 plantas del surco central.

El plan de manejo en todas la EE y para cada una de las investigaciones se ajustó a un mismo criterio, de acuerdo con las recomendaciones técnicas derivadas de las investigaciones de Cenicafé. El plan de fertilización se definió en cada localidad de acuerdo con los resultados del análisis de suelo.

Variables de respuesta

Variable agronómica. Durante los años descritos con anterioridad (Tabla 2), se registró la producción de café cereza por cada pase² y se acumuló por cada mes, semestre y año.

La información fue obtenida para cada una de las plantas de cada progenie. Por cada EE y por año se obtuvieron las curvas de producción mensual y se estableció el mes pico de cosecha (mes con mayor cantidad de café cereza recolectado), el cual sirvió como referente para obtener los indicadores bioclimáticos.

Variables ambientales: En cada sitio se contó con una estación climatológica principal, lo que permitió recolectar la información diaria de precipitación (PP), brillo solar (BS), temperatura media, temperatura mínima y temperatura máxima.

Momentos fisiológicos previos a cosecha

Diez meses previos a la floración (e0) que determina el pico de cosecha principal. Corresponde al período entre 10 meses y 4 meses previos a la floración, en el cual se inicia la inducción de las yemas florales (P2) y finaliza cuando éstas sobrepasan las estípulas (P3), relacionada con buena disponibilidad de agua, bajo brillo solar e incremento de la temperatura en P2 y cambios en el estado hídrico en la P3 (15).

Cuatro meses previos a la floración (e1) que determina la cosecha principal. Corresponde a los días previos a la floración, inicia cuando las yemas de la inflorescencia sobresalen de las estípulas y, cuando el botón floral latente, con pétalos cerrados de color blanquecino, aumenta su longitud, propiciada por la lluvia después de un estrés hídrico, se produce la floración (5, 15).

Ocho meses previos a la cosecha principal (e2). Se cumplen en este rango, el desarrollo de las fases I y II de formación del fruto de

² Un pase corresponde a cada entrada al cultivo para realizar la recolección de café cereza, regularmente se realizan entre 15 y 20 pases en el año.

Tabla 3. Genealogía de las progenies evaluadas en nueve Estaciones Experimentales de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, durante los años 2000 a 2009. En la parte superior de cada recuadro se especifica el experimento y los años de evaluación de la producción.

Experimento A (2000-2002)				
Genotipo	F3	F2	F1	Cruzamiento
BG0459	B219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH1247	A219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH1409	B222	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BH0813	A222	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
BI0712	B219	PL1000	Ar.1324	CR-CV1 x H de T 1343-I.574-CV2
CU1778	B988	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1792	B991	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1798	B991	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1812	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1815	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1825	B997	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1842	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1843	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1849	B998	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1871	B1030	PL2036	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1911	B1171	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1928	B1171	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1951	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1953	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1970	B1233	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1972	B1289	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1991	B1290	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU1993	B1290	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU2021	B1315	PL1859	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CU2034	B1340	PL2092	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2065	B1361	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2074	B1361	PL1889	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2171	B1322	PL2054	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2188	B1322	PL2054	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2375	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2385	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2391	B1239	PL1902	M.2386	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2432	B1176	PL1979	M.2387	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2567	B1147	PL2030	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2708	B1096	PL2094	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2720	B1096	PL2094	M.2392	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
CX2866	B1029	PL2036	M.2391	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA

Continúa...

...continuación

Experimento A (2000-2002)				
Genotipo	F3	F2	F1	Cruzamiento
DG0812	A219	PL1000	Ar.1324	CR-L.426 x H de T 1343 MEZCLA
DH0004	AW3089	PL2221	Tr.958	CA-L.572 x H de T 1343 MEZCLA
Cat_CC	Testigo			Caturra sin control de roya
Cat_SC	Testigo			Caturra con control de roya
Var_Co	Testigo			Variedad Colombia

Experimento B (2007-2009)			
Familia	F2	F1	Cruzamiento
A170	PL1386	AR1322	CA-CV1 x HT,1343-I.574-CV2 (H3001)
AX2342	PL707	M2383	CA-L,572 x HT.1343 Mezcla (H3004)
AX2383	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
AY2557	AY2557	BM339	CR x HT,1568 (Híbrido 3029)
B1027	PL2036	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1030	PL2036	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1047	PL767	M2383	CA-L,572 x HT.1343 Mezcla (H3004)
B1096	PL2094	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1148	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1160	PL2092	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1171	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1176	PL1979	M2387	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1233	PL1902	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1239	PL1902	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1289	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1290	PL2030	M2391	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1320	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1322	PL2054	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1340	PL2092	M2392	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B1361	PL1889	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B988	PL1889	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B997	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)
B998	PL1859	M2386	CR-426 x HT,1343 Mezcla (Híbrido 3005)

café (5, 6), al final de las cuales la semilla alcanza su tamaño final.

Cuatro meses previos a la cosecha principal (e3). Es una etapa en la cual el grano de café adquiere su mayor consistencia y peso final, correspondiente a las fases III y IV de desarrollo del fruto (5, 6)

Factores ambientales modelados

Índices de humedad. Se utilizó la metodología descrita por Jaramillo y Gómez (38); para calcular el balance hídrico, en ella se combinan metodologías ajustadas para la zona cafetera. La evapotranspiración potencial se generó a partir de la expresión exponencial calculada

por Jaramillo (30), basada en el método de Penman - Monteith y la altitud. En conjunto, la metodología del balance hídrico está concebida en la desarrollada por Thornthwaite y Mather, adaptada por Jaramillo (29). El balance hídrico incorpora en la metodología, la capacidad de retención de humedad del suelo, que fue obtenida de los estudios detallados de suelo de cada EE, los estudios agroecológicos y de clima de los ecotopos cafeteros y de los resultados de investigaciones obtenidos por las disciplinas de Agroclimatología y de Suelos de Cenicafé.

A partir del índice de evapotranspiración (IHS), resultante de la rutina, se generaron dos índices que se tuvieron en cuenta para relacionarlos con los cuatro momentos fisiológicos, descritos con anterioridad:

Déficit Hídrico Moderado (DM) = $0,5 \leq IHS \leq 0,8$ (6)

Déficit Hídrico Fuerte (DF) = $IHS < 0,5$ (6)

En cada etapa se contabilizaron, de manera independiente, los días que cumplieran con los criterios de los dos índices (46), además de la lluvia diaria (PP) acumulada (Tabla 4).

Índices de Brillo Solar. Utilizando la metodología descrita por Ramírez *et al.* (51), se generó el índice de déficit de brillo solar (DBS), el cual se calculó por diferencia entre el brillo solar astronómico (N) y el brillo solar observado (Ecuación <1>). En cada una de las etapas fisiológicas establecidas se contabilizaron las horas de brillo solar y los días con $DB < 7,2$. (Tabla 4)

$$DBS = N - BS \text{ <1>}$$

Índices térmicos. Jaramillo y Guzmán (37), definieron la temperatura base inferior (Tbase) para el cultivo de café en Colombia en 10°C, a partir de ésta y la temperatura

media (Tmedia) se calculó el índice de tiempo térmico (TT) mediante la Ecuación <2>.

$$TT = (Tmedia - Tbase) \text{ <2>}$$

De manera reciente, algunas investigaciones (45, 47, 48, 51) han utilizado el concepto de TT, por su relación con la acumulación diaria de energía, la cual permite determinar los grados/día necesarios para alcanzar diferentes fases fenológicas.

A partir de la temperatura máxima (Tmáx) y la temperatura mínima (Tmín) se generó el índice de amplitud térmica (AT), descrito en la Ecuación <3>

$$AT = (Tmáx - Tmín) \text{ <3>}$$

Para cada una de las tres etapas fisiológicas propuestas se contabilizaron los grados/día y el número de días con $AT < 10$ (51). Los indicadores se muestran en la Tabla 4.

Métodos para el análisis de los datos. El experimento A, el cual originalmente se estableció con un Láttice (6x7), conservó como bloques las repeticiones y se eliminó el sub-bloqueo; en el experimento B, se consideraron los genotipos constituyentes de la población F3, los cuales conformaron entre dos y siete repeticiones.

Ambientes. Se generaron tantos ambientes como EE por año; en el experimento A se definieron 15 ambientes y 21 ambientes para el experimento B. En cada ambiente se consolidó la información de producción de café cereza por planta, para cada genotipo.

Indicadores bioclimáticos. Antes de abordar la incorporación de los indicadores en las evaluaciones, se realizaron análisis descriptivos y correlaciones de Pearson a las 28 indicadores bioclimáticos, con el fin de depurarlos teniendo

Tabla 4. Indicadores bioclimáticos obtenidos por la combinación de los elementos e índices climáticos con los eventos fisiológicos.

Siglas	Descripción del indicador bioclimático
PPe0	Lluvia acumulada entre 10 y 4 meses previos a la floración
PPe1	Lluvia acumulada en los 4 meses previos de floración
PPe2	Lluvia acumulada entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
PPe3	Lluvia acumulada 4 meses previos a la cosecha principal
TTe0	Grados día acumulados entre 10 y 4 meses previos a la floración
TTe1	Grados día acumulados en los 4 meses previos de floración
TTe2	Grados día acumulados entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
TTe3	Grados día acumulados en los 4 meses previos a la cosecha principal.
ATe0	Número días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, entre 10 y 4 meses previos a la floración
ATe1	Número días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, 4 meses previos a la floración
ATe2	Número de días acumulados con amplitud térmica inferior a 10 grados, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
ATe3	Número de días acumulados, con amplitud térmica inferior a 10 grados, 4 meses previos a la cosecha principal
BSe0	Horas de brillo solar acumulado entre 10 y 4 meses previos a la floración
BSe1	Horas de brillo solar acumulado en los 4 meses previos de floración
BSe2	Horas de brillo solar acumulado entre los 8 y los 4 meses previos de cosecha principal
BSe3	Horas de brillo solar acumulado 4 meses previos a la cosecha principal
DBe0	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, entre 10 y 4 meses previos a la floración
DBe1	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, 4 meses previos a la floración
DBe2	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DBe3	Número de días acumulados con valores de déficit de brillo solar inferiores a 7,2, 4 meses previos a la cosecha principal
DMe0	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, entre 10 y cuatro meses previos a la floración
DMe1	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, cuatro meses previos a la floración
DMe2	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DMe3	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico moderado, 4 meses previos a la cosecha principal
DFe0	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, entre 10 y 4 meses previos a la floración
DFe1	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, 4 meses previos a la floración
DFe2	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, entre 8 y 4 meses previos a la cosecha principal
DFe3	Número de días acumulados con valores de déficit hídrico fuerte, 4 meses previos a la cosecha principal

en cuenta las correlaciones. En este sentido se asumió que variables correlacionadas, con coeficientes de determinación superiores a 0,8 (valor absoluto) y con significancia estadística, tenían la misma capacidad de respuesta, por lo cual sólo se dejaron aquellas que explicarían la mayor proporción de las otras variables.

Análisis de la información

Análisis de varianza (anava) simple. Se verificó, mediante rutinas de anava a cada uno de los ambientes, la diferenciación de respuestas en producción de los genotipos, mediante el siguiente modelo (Ecuación <4>).

$$Y_{ki} = \mu + b_k + G_i + e_{ki} \text{ <4>}$$

Donde: Y_{ki} es el valor medido, μ es la media general, b_k es el efecto del bloque, G_i el efecto del genotipo o familia y e_{ki} el error.

Para el análisis combinado se descartaron aquellos ambientes que no denotaron diferencias al 12% en la prueba F.

Anava combinado. Para cada experimento, la existencia de la GxE se comprobó con el modelo que se presenta en la Ecuación <5>.

$$Y_{kij} = \mu + G_i + A_j + b_{kj} + GA_{ij} + e_{ki} \text{ <5>}$$

Donde: Y_{kij} es el valor medido, μ es la media general, G_i es el efecto genotípico, A_j es el efecto ambiental, b_{kj} es el efecto del bloque k dentro del ambiente j, GA_{ij} es la interacción del genotipo i con el ambiente j y e_{ki} el error; este método se basa en el concepto dinámico o agronómico de la estabilidad (11). La significancia se estimó en un supuesto de un modelo fijo.

Cuadrados mínimos parciales (PLS por su sigla en inglés). El PLS se puede representar

de acuerdo a las Ecuaciones <6> y <7>:

$$X = TP' + E \text{ <6> Variable independiente}$$

$$Y = TQ' + F \text{ <7> Variable dependiente}$$

Donde: T contiene los puntajes de X, P contiene las cargas de X, Q contiene las cargas de Y, E y F son los residuales (52).

La matriz Y consistió en la variable de rendimiento, medida sobre los genotipos en diferentes localidades y la matriz X comprendió las covariables ambientales (indicadores bioclimáticos) calculadas para las localidades.

Para efectos de realizar el análisis de los datos, conforme la propuesta arriba descrita, se utilizó el paquete estadístico SAS (56) el cual proporciona los procedimientos proc GLM, proc Mixed, proc Cor, proc IML y proc PLS, para estos dos últimos se utilizó la rutina descrita por Vargas y Alvarado (62).

Representación e interpretación resultados

PLS. Las variables explicativas son combinaciones lineales del conjunto de medidas ambientales y genotípicas, comúnmente llamadas factores PLS. Los resultados de la descomposición bilineal obtenida del PLS se representan en un gráfico biplot que incluye los genotipos, las localidades y las covariables (18, 63, 64).

La interpretación de los biplot se derivó de las indicaciones de Gabriel (24), Gauch Jr (25) Kroonenberg (41), Vargas y Crossa (63) y Van Eeuwijk (61).

RESULTADOS

Análisis de varianza (ANAVA)

Análisis simple. Se verificó la respuesta de los genotipos por cada ambiente, a

partir de los resultados se descartaron aquellos ambientes que no mostraron diferencias de los genotipos en respuesta a la variable de producción por planta. La EE Santander, en el experimento B, no presentó respuestas diferenciales de los genotipos en alguno de los años de evaluación, razón por la cual no se incluyó en los siguientes análisis. Adicionalmente, Paraguaicito 2008 y El Tambo 2007, en el mismo experimento, fueron retirados para los análisis combinados y multivariados, debido a que para los años mencionados los genotipos no presentaron diferencias en respuesta a la variable, al igual como se mencionó para la EE Santander.

Análisis combinado. La GxE explica el 9,1% y 15,3% de la suma de cuadrados en los experimentos A y B respectivamente. La mayor varianza explicada se observa en los ambientes del experimento A y en la GxE del B. Todos los factores mostraron diferencias altamente significativas, de interés especial la de GxE, que demuestra la existencia de respuestas diferenciales de los genotipos (Tabla 5). La Tabla 6 muestra los valores de producción media anual, las EE Paraguaicito y El Rosario, presentes en ambos experimentos, tienen comportamiento superior. Lo contrario sucede con las EE Tambo, Pueblo Bello y Santa Bárbara. Para este último grupo, la baja producción pudo estar influenciada por la condición de sombrío en Pueblo Bello. Para El Tambo, su altitud, temperaturas bajas y condiciones de nubosidad definen un patrón de crecimiento lento del café. Otras condiciones, relacionadas con el sitio de siembra, influyeron en Santa Bárbara.

Producción media de los genotipos. En las Tablas 7 y 8 se resaltan los genotipos en cada localidad, con valores por encima del percentil 75.

Experimento A. En la Tabla 7 se presenta la información de producción expresada en $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ de café cereza por planta, de los genotipos evaluados en el experimento A. Los genotipos CU1812, CU1815, CX2188, CX2866 y los testigos 1 y 2 obtuvieron una media general superior. CU1812 y CU1815 presentaron buen desempeño en todas las EE a excepción de Naranjal, donde los genotipos BH0813, testigo2 y BI0712 fueron superiores. En los años en que se realizó la investigación (1999 – 2002) se alternaron las condiciones climáticas; entre 1999 e inicios de 2001 predominaron condiciones de La Niña, entre 2001 e inicios de 2002 condiciones Neutro y el resto de 2002 condiciones de El Niño, las cuales permitieron obtener respuestas genotípicas contrastantes.

Experimento B. La información de producción del experimento B se presenta en la Tabla 8, se expresa en $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ de café cereza por planta. Tres familias se destacan por las medias de producción superior, la B997, B1289 y B1160. Aunque prevalecieron las condiciones climáticas de evento La Niña, el hecho de la familia B997 de haber obtenido la mejor producción de manera permanente, es cualidad de estabilidad y adaptación general.

La característica principal de los materiales evaluados es su alto nivel de homocigosis (>85%) y su origen genético similar. La primera característica nos permite medir el efecto ambiental sobre el genotipo y la segunda implica que su base genética estrecha reduzca la eficiencia de selección, lo que unido a una interacción GxE significativa, dificulta la selección de genotipos por amplia adaptación, situación que hace necesario el uso de herramientas estadísticas complementarias para establecer los factores que están influyendo en las respuestas diferenciales.

Tabla 5. Cuadrados medios para la variable de producción (kg/planta) obtenida sobre 42 genotipos y 15 ambientes (A); 23 familias y 16 ambientes (B).

Fuente de Variación	Experimento A		Experimento B	
	Gl	CM	gl	CM
Ambiente	14	2918,56**	15	15,64**
Bloque(Ambiente)	30	84,65	96	0,41
Genotipo	41	39,96**	22	3,59**
Genotipo*Ambiente	574	11,98**	330	0,98**
Error	18240	2,26	528	0,56
Coeficiente de Variación	36,17		25,91	

** Denota significancia estadística al 1%

Tabla 6. Producción media anual de café cereza por planta, expresada en kg, en ocho EE de la geografía cafetera colombiana.

Estación Experimental	Experimento A kg/planta (2000-2002)*	Experimento B kg/planta (2007-2009)*
La Catalina		2,98
Naranjal	3,68	2,53
Paraguacito	4,86	4,63
Pueblo Bello		1,76
El Rosario	5,09	3,48
Santa Bárbara	1,87	
El Tambo		2,12
La Trinidad	5,28	
Promedio	4,15	2,89
DMS	0,078	0,24

* Las distancias de siembra del experimento A (1m x 2 m) fueron diferentes a las del experimento B (1 m x 1,5 m) lo cual influye en la producción por planta y determina que ésta no sea comparable entre experimentos.

Indicadores bioclimáticos

Relación con patrones de cosecha. En la Tabla 9, se presentan los promedios de los indicadores construidos con las variables climáticas obtenidas durante los años de investigación. Las EE El Tambo, La Trinidad y Santa Bárbara registraron los menores valores de TT, mientras los mayores se observaron en Paraguacito. El mayor registro de este indicador determina un patrón acelerado de crecimiento y desarrollo de la planta y del fruto. Los mayores valores de los indicadores bioclimáticos de AT en

La Trinidad, reflejan una condición más regulada térmicamente entre cuatro meses previos a la floración y los primeros cuatro meses de formación del fruto. El indicador de DB en Pueblo Bello define un mayor número de días en el cuarto trimestre, con registros inferiores de 7,2 h, lo que está mediado por una condición de mayor brillo solar. Por cuatrimestre, los menores valores de DF los registra la EE Naranjal, situación contraria a la EE Pueblo Bello. Para DM la EE El Tambo registra los menores datos, mientras lo contrario sucede con las EE La Catalina y La Trinidad.

Tabla 7. Producción media (kg.año⁻¹) de café cereza por planta, del grupo de genotipos evaluados en el experimento A, entre los años 2000 y 2002.

Genotipo	El Rosario	Naranjal	Paraguaicito	Santa Bárbara	Trinidad
BG0459	4,23	3,91	4,96	1,65	5,95
BH0813	4,58	4,70	4,71	1,69	5,59
BH1247	5,63	3,31	4,93	2,42	5,56
BH1409	4,47	3,83	4,16	1,62	5,37
BI0712	5,31	4,61	5,20	1,66	5,16
CU1778	5,51	4,21	4,73	2,41	4,87
CU1792	4,92	2,54	4,76	1,74	5,39
CU1798	4,91	2,50	4,76	1,84	5,25
CU1812	6,7	3,00	5,52	2,85	5,80
CU1815	6,73	2,78	5,58	2,26	6,12
CU1825	5,72	3,00	4,80	2,02	5,19
CU1842	4,75	3,78	4,75	1,74	4,66
CU1843	5,17	2,99	4,95	1,86	5,10
CU1849	5,12	3,49	5,11	1,91	4,85
CU1871	4,85	4,00	4,00	1,42	4,88
CU1911	4,67	3,49	5,30	1,59	5,09
CU1928	4,66	3,62	5,42	1,51	5,57
CU1951	5,39	4,03	4,03	1,77	5,71
CU1953	4,8	3,79	4,62	1,78	4,45
CU1970	4,73	3,76	4,43	1,84	5,79
CU1972	4,46	3,97	5,05	2,08	5,57
CU1991	5,47	3,63	4,75	1,92	5,32
CU1993	4,73	3,73	4,78	1,80	5,52
CU2021	5,14	3,62	5,32	2,35	5,36
CU2034	5,32	3,44	4,58	1,65	5,47
CX2065	4,89	3,72	4,95	2,00	5,10
CX2074	5,54	3,96	5,10	1,82	5,33
CX2171	5,41	2,89	4,81	2,09	5,78
CX2188	5,6	4,37	4,88	1,76	5,58
CX2375	3,9	2,87	4,44	1,35	4,91
CX2385	5,07	3,48	5,04	1,73	5,30
CX2391	4,66	3,27	5,21	1,77	5,52
CX2432	3,84	3,45	4,49	1,95	4,68
CX2567	4,29	4,16	4,89	1,25	3,68
CX2708	4,66	4,49	4,06	1,76	4,86
CX2720	4,73	3,76	4,47	1,63	4,32
CX2866	5,89	3,49	4,96	1,40	6,35
DG0812	5,51	3,98	5,42	1,66	5,06
DH0004	5,22	3,20	5,02	1,80	4,24
TEST1	5,82	4,38	5,15	2,73	6,02

Continúa...

...continuación

Genotipo	El Rosario	Naranjal	Paraguaicito	Santa Bárbara	Trinidad
TEST2	5,33	4,66	5,18	2,64	6,05
TEST3	5,3	4,57	4,65	1,93	5,40
Promedio	5,09	3,68	4,86	1,87	5,28
DMS	0,61	0,56	0,48	0,32	0,51

DMS. Diferencia mínima significativa.

Regresión de cuadrados mínimos parciales.

Ejecutada la rutina PLS descrita por Vargas y Alvarado (62), bajo la plataforma de SAS, con la información fenológica de producción y correlacionadas las respuestas con los indicadores bioclimáticos antes descritos, se aprecian las siguientes respuestas:

Experimento A. Los dos primeros factores explican el 51% de las respuestas del modelo, la Figura 1 representa la información de salida del análisis. Un detalle de las cargas para las variables ambientales, muestran para el primer factor predominio de los indicadores bioclimáticos Atel y TTe1, para el segundo factor predominaron los efectos de DBe2 y e3. El primer factor está relacionado con estímulos de ocurrencia de la floración o períodos de máxima actividad fotosintética y por consiguiente mayor crecimiento (42, 46), mientras en el segundo factor se relacionan con los índices que determinan una eficiencia fisiológica (acumulación de biomasa) durante el desarrollo del fruto (53).

En la Figura 1, los ambientes están representados por los vectores, al final de los cuales el nombre corresponde a las iniciales de cada EE, precedidas por el año. El año 2000 se distancia en la mayoría de EE, al cual le precedieron eventos del fenómeno de La Niña y por alguna razón no se encuentra mayor asociación entre los índices bioclimáticos y la respuesta en ese año en particular.

En la parte superior hacia el centro, se encuentran ambientes de la EE El Rosario, con gran magnitud de sus vectores, lo cual determina alta capacidad de generación de respuestas diferenciales de los genotipos. Para esta EE, los indicadores de DB y DF tienen interacción positiva con los genotipos CX2074, CU1951, CX2385, BH1247, CX2188, CU1815, CU1812, CX2866, CU1825 y DG0812. De manera independiente el año 2000 para esa EE encuentra afinidad con AT y el genotipo CX2171.

En la parte derecha hacia el centro confluyen las EE Paraguaicito y Naranjal. Los genotipos DH0004, BI0712, DG0812, CX2567 y CX2432 estarían relacionados con respuestas positivas a los indicadores de TT, PPe2 y DBe1 de la EE Paraguaicito. La EE Naranjal encuentra mayor afinidad de respuestas diferenciales con DM y DFe2 en 2001 y TT para el año 2002; los genotipos que mejor se expresan en dicha EE corresponden a CX2567, CX2720, BG0459, BI0712, CU1911, BH0813 y BH1409. En el cuadrante superior izquierdo predominan años de La Trinidad los cuales están influenciados por la AT; se destacan por sus respuestas los genotipos CU1815, CU1812, CU1825, CX2866, CX2171 y CX2188. En el cuadrante inferior izquierdo predominan años de la EE Santa Bárbara, la cual presenta poca magnitud de sus vectores ambientales de los años 2001 y 2002, las respuestas diferenciales tienen relación con PPe2 y DFe2. Los genotipos que mejor respuesta expresan en algunos de esos años son BH1409, CU1849 y el testigo2.

Tabla 8. Producción media (kg.año⁻¹) de café cereza por planta, del grupo de genotipos evaluados en el experimento B, entre los años 2007 y 2009.

Familia	La Catalina	Naranjal	Paraguaito	Pueblo Bello	El Rosario	El Tambo
A170	3,08	3,04	4,57	1,84	3,95	2,86
AX2342	3,00	2,19	3,65	2,75	4,08	1,96
AX2383	3,60	2,32	4,42	2,11	4,90	2,78
AY2557	4,00	2,42	4,03	1,18	3,22	2,45
B1027	3,67	2,81	4,57	1,39	4,25	2,04
B1030	2,96	2,22	4,82	1,51	4,94	2,10
B1047	2,18	2,42	5,85	2,38	2,66	2,05
B1096	2,22	2,60	3,83	2,25	3,41	1,45
B1148	3,39	2,45	5,18	1,66	1,84	1,71
B1160	4,36	3,46	5,80	2,32	3,72	2,77
B1171	2,38	2,14	4,54	1,12	3,20	2,26
B1176	2,17	2,09	4,30	1,97	2,74	1,63
B1233	2,39	2,26	4,26	1,81	3,63	1,95
B1239	2,90	2,07	5,19	1,89	3,16	2,33
B1289	3,38	3,39	5,13	2,25	4,10	3,18
B1290	3,02	2,67	4,64	2,23	3,49	1,45
B1320	2,88	2,46	5,36	1,66	3,41	1,54
B1322	2,99	2,27	5,01	1,65	5,11	2,62
B1340	3,96	2,54	5,55	1,74	3,37	3,04
B1361	2,68	2,32	4,32	1,74	2,77	2,69
B988	3,27	1,87	4,09	1,32	4,08	4,12
B997	3,67	3,63	6,70	1,95	4,80	1,73
B998	3,41	1,97	4,47	1,65	3,14	1,99
Promedio	2,919	2,415	4,694	1,842	3,624	2,209
DMS	1,029	1,118	2,428	0,963	1,694	1,048

DMS. Diferencia mínima significativa.

Experimento B. Los dos primeros factores explicaron el 56% de las respuestas del modelo, la Figura 2 representa la información de salida del análisis. Un detalle de las cargas para las variables ambientales, muestran para el primer factor predominio de las variables ATe1, DBe1 y DFe1, mientras que para el segundo factor predominaron los efectos de las variables DBe0 y DMe2. Con una mayor proporción, el primer factor es explicado por variables que se relacionan con el evento de la floración, mientras en el segundo factor se relaciona con estímulos que desencadenan

la diferenciación floral y pueden afectar el desarrollo del fruto en su etapa inicial.

El genotipo B1361 tiene mérito de adaptación general, pero su potencial de producción es bajo. En el cuadrante superior derecho se encuentran los ambientes de la EE Pueblo Bello, con gran magnitud de sus vectores, los índices de DB y DF, tienen la mayor interacción positiva con los genotipos AX2342, B1047 y B1096. La EE Paraguaito tendría mayor interacción con los indicadores de TT que influyen en la respuesta de los

Tabla 9. Resumen de los indicadores bioclimáticos obtenidos para cada EE. Promedio de nueve años.

Índice bioclimático	El Tambo	Paraguaicito	La Trinidad	La Catalina	Naranjal	Santa Bárbara	El Rosario	Pueblo Bello
ATe1	44	40	94*	66	66	72	87*	11
ATe2	92	40	101*	65	63	78	97*	49
DBe1	62	59	42	54	55	42	70	111*
DBe3	49	62	64	54	56	51	74	82*
DBe2	59	50	42	42	47	33	63	76*
DFe0	60	76	52	41	22	80*	43	64
DFe1	85	36	58	19	12	31	54	108*
DFe3	43	73	70	34	17	79*	32	33
DFe2	23	42	31	20	12	21	31	53*
DMe0	32	30	42*	36	28	24	26	26
DMe1	8	23	19	24*	21	20	19	4
DMe3	20	15	15	31*	21	7	17	18
DMe2	20	27	32*	24	19	25	18	17
PPe2	996	799	836	1.004	1.087*	920	1.024	808
TTe1	1.090	1.414*	1.209	1.363	1.325	1.171	1.254	1.303
TTe2	1.032	1.455*	1.221	1.372	1.341	1.225	1.266	1.410

*Mayores y menores valores de los indicadores en las diferentes EE La descripción y las unidades en que se expresan se encuentran relacionados en la Tabla 4.

genotipos B1160, B1047, B1148 y B1320. En el cuadrante superior izquierdo confluyen localidades de la EE El Rosario y El Tambo, los cuales están influenciados por la AT y PPe2. Por su parte, los genotipos B1030, AX2383, B1322, B1288 y B988 estarían relacionados con respuestas positivas en los ambientes de ambas EE. En el cuadrante inferior izquierdo predominan localidades de las EE Naranjal y La Catalina, los genotipos que mejor representan su relación con los indicadores bioclimáticos de DM son: AY2557, B1027, B1160, B1047, B1340, B1171 y B997.

DISCUSIÓN

Con la información de dos investigaciones realizadas por la disciplina de Mejoramiento Genético de Cenicafé, que recogieron la mayor variabilidad climática a la cual puede estar sometido un análisis de GxE, es posible explicar el comportamiento en producción de los genotipos evaluados. Estudios realizados

con trigo y algodón que incluyeron covariables ambientales y de manejo, en un análisis similar, encontraron relaciones entre los estados fisiológicos, los factores ambientales o de manejo y las expresiones fenotípicas relacionadas con el rendimiento (20, 49, 52, 65). En los experimentos de la presente investigación los dos primeros factores de la regresión PLS explicaron entre 51% y 56% de la GxE, valores que se aproximan a los obtenidos en otras investigaciones realizadas en trigo, girasol, soya y maíz (9, 20, 67) y más bajos que los obtenidos por Vargas *et al.* (64) en trigo. Sin embargo, las condiciones de esta investigación permiten dar alcance a los últimos avances realizados en el cultivo del café, en los cuales las condiciones ambientales han sido relacionadas con eventos fisiológicos, principalmente hasta la floración.

PLS Experimento A. Las condiciones de La Niña en el año 2000, con casi la totalidad

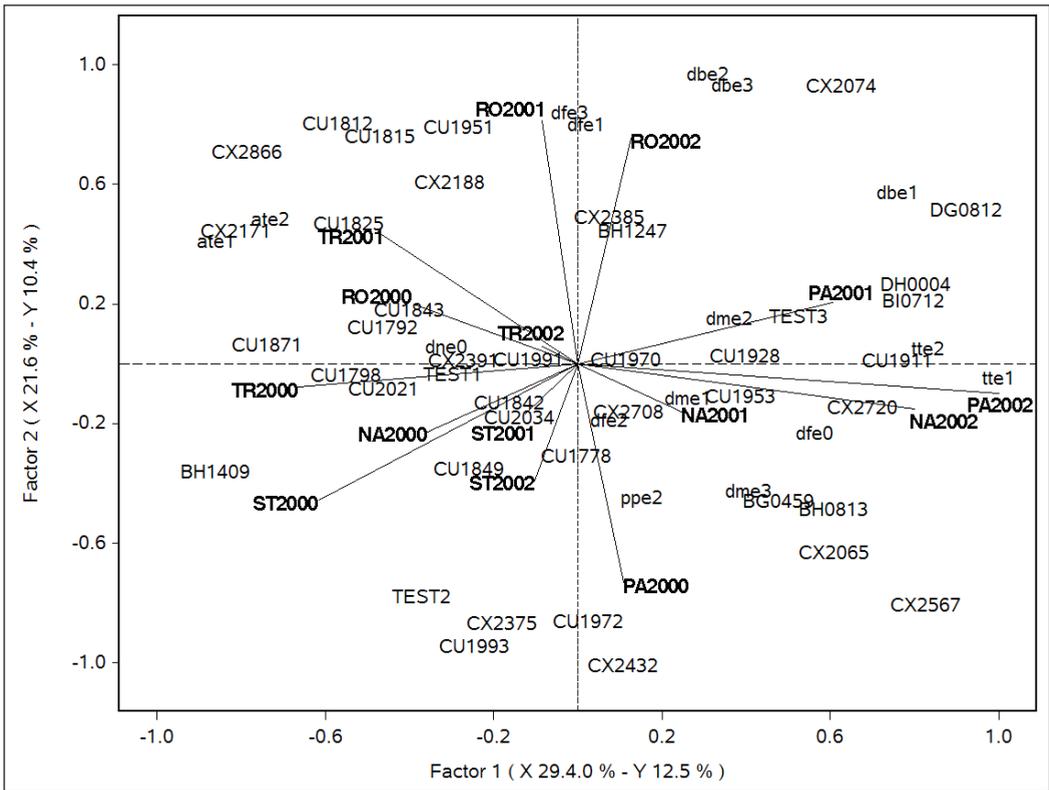


Figura 1. Biplot de los dos primeros factores del PLS, experimento A, que representan los puntajes de 15 ambientes (resaltado) y la carga de los 42 genotipos evaluados, enriquecido con la carga de 16 indicadores bioclimáticos (minúscula). RO: Estación El Rosario; TR: Estación La Trinidad; NA: Estación Naranjal; ST: Estación Santa Bárbara; PA: Estación Paraguaicito; seguidas del año de evaluación.

de los días con AT <10°C, permitieron en la EE El Rosario expresiones productivas sobresalientes de los genotipos CU1815, CU1812 y CX2866. En los siguientes años, especialmente el año 2002, la condición de mayor número de días con DB<7,2 en las fases de desarrollo del fruto y el DFe1 influyeron en la buena expresión de los genotipos, además de los anteriores, CX2074, DG0812 y BH1247. El mayor DFe1 se relacionó con buena expresión de floración, que junto con mayor oferta de radiación en las etapas de desarrollo del fruto, combinada con menor amplitud térmica, favoreció la acumulación de grados día y éstos en la acumulación

de biomasa. La situación no fue mejor en el año 2001 ya que se presentó un período con DF en la Etapa 3.

En la EE Paraguaicito la condición de lluvia bimodal marca la DF hacia mitad y finales de año, que generalmente afectan la tercera y cuarta fase de desarrollo del fruto (6) y repercuten en la concentración de la floración (50), respectivamente. Los períodos de déficit en los años evaluados no se registraron de manera continua, a excepción de 2002, entre julio y agosto, cuando se registraron 35 días con DF. La condición de mayor TT permitió una mayor

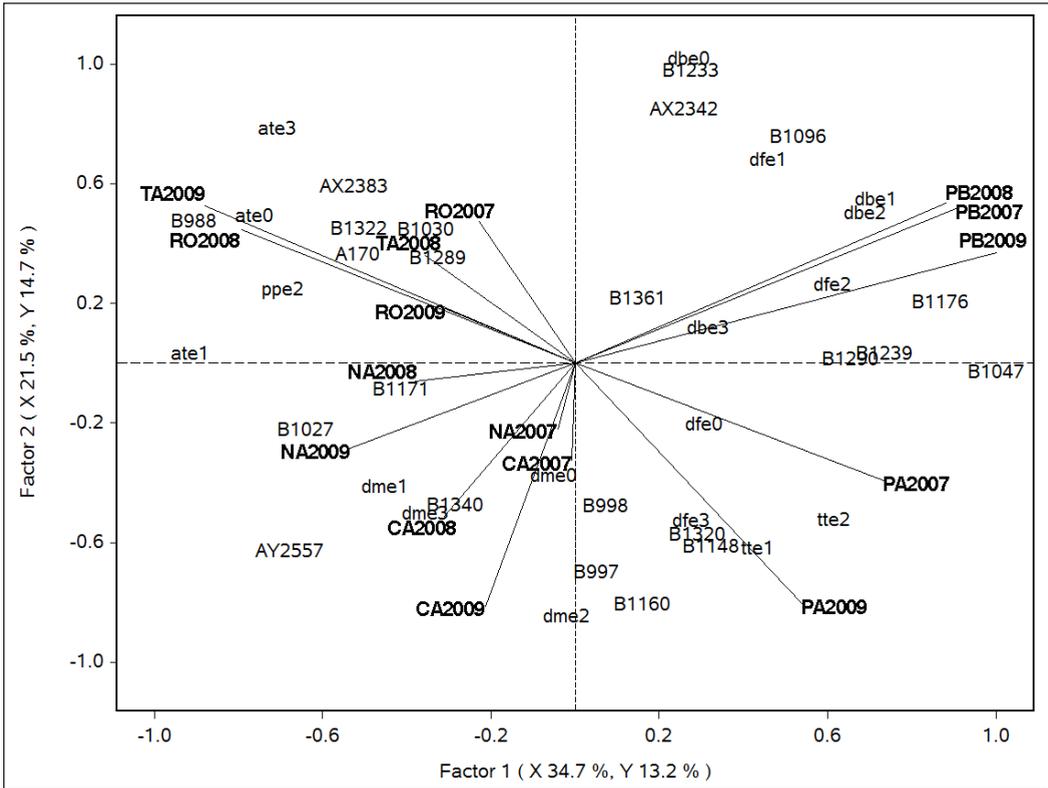


Figura 2. Biplot de los dos primeros factores del PLS, experimento B, que representan los puntajes de 16 ambientes (resaltado) y la carga de 23 genotipos evaluados, enriquecida con la carga de 17 variables ambientales (minúscula). RO: Estación El Rosario; TA: Estación El Tambo; NA: Estación Naranjal; CA: Estación La Catalina; PB: Estación Pueblo Bello; PA: Estación Paraguaicito; seguidas del año de evaluación.

acumulación de biomasa, la cual maximizó los potenciales de producción en el año 2001 de los genotipos CU1911 y DH004 y B10712 y DG0812 en 2002.

El primer año de producción en la EE Naranjal fue superior y disminuyó a través de los años. En el año 2000, con influencia de La Niña, los indicadores bioclimáticos de DF y DM fueron bajos, se aumentaron los días con AT<10°C y disminuyó el TT, situaciones que permitieron una mejor expresión de la producción, sin que pueda atribuirse a una condición ambiental en particular. El año 2001, en condición de clima normal se

incrementó el DM, sobre todo en la fase final de desarrollo del fruto, los días con AT inferior a 10°C representaron el 50% en las e1 y e3; para este caso la producción fue inferior y pudo estar relacionado con ausencia de suficientes días con estrés hídrico previos a la floración. En el año 2002 la condición de El Niño, aunque favoreció la floración, dado el incremento de DF previo a su expresión y que los valores de TT se incrementaron en más de 100 grados día con respecto al año 2000, la producción fue inferior a la de 2001, sin embargo, los genotipos B10712 y el BH0813 sobresalieron por su alta producción.

La EE La Trinidad presentó una condición estable en la producción durante los tres años de la investigación aunque con cambio en el orden de mérito de los genotipos. Los genotipos CX2866, CU1815, CU1812 y testigo1, con influencia de los indicadores de ATel y ATe2, presentaron las mejores expresiones en producción en todos los años, alternando con ellos los genotipos BG0459, CU1970 y CX2171, como se aprecia en la Figura 1, lo cual es coincidente con la información que se resalta en la Tabla 6 para esta EE. Una observación sobre el patrón de cosecha en esta EE, nos muestra que al contrario de lo reportado por varios autores (39) la concentración de la cosecha se registró en el segundo semestre con fluctuaciones entre 57% y 74% y con picos de cosecha entre los meses de septiembre y noviembre.

La expresión de producción de la EE Santa Bárbara fue baja, la buena oferta climática que se refleja en BS y AT se restringió por más de 73 días con DF en las dos últimas fases de desarrollo del fruto, que probablemente generaron pasillas o granos averanados (6). El análisis de la producción permite observar un comportamiento bianual, reflejado en la caída de un 50% de la producción, entre 2000 y 2001, y un aumento del 240% entre 2001 y 2002. La EE Santa Bárbara también ha sido reportada con su concentración de cosecha en el primer semestre, en el mes de junio (39), para nuestro caso correspondió al segundo semestre, con fluctuaciones entre 55% y 81% de la cosecha anual, con mes pico en octubre.

PLS Experimento B. En la EE Paraguaicito la condición de DF entre julio y septiembre de 2006, concentró la floración entre septiembre y octubre de ese año, que junto con el mayor TT permitió la mejor producción del primer semestre del 2007. Las condiciones de La Niña prevalentes en 2009 favorecieron el desarrollo

normal de las plantas, que regularmente encuentran restricción por temperatura y déficit hídrico. Los indicadores de TT tienen buena relación con las condiciones que imperaron en los años de estudio y permitieron la expresión en producción de los genotipos B1047, B1160 y B997, con producciones superiores a 5.000 kg.ha-año⁻¹ de café pergamino seco.

El grupo conformado por las EE Naranjal y La Catalina presentó la menor restricción al desarrollo del cafeto; por estar ubicadas en las mejores condiciones agroclimáticas, son sensibles a pequeños cambios entre ellos los de DM, principalmente los que ocurren entre cuatro meses previos a la floración y los primeros cuatro meses de desarrollo del fruto. No obstante, las condiciones prevalentes de La Niña, repercutieron en las producciones, la lluvia registrada en 2008 superó en más del 45% al promedio histórico, situación que no permitió una mejor expresión, sobre todo de la floración (10). Las condiciones climáticas previas a la cosecha de 2007 fueron mucho mejores, esta situación se observa en los registros de producción (Tabla 8). En este caso el índice de DM puede interpretarse de dos formas, como un estímulo que se requiere para garantizar eventos como el de la floración del cafeto (6, 39), o como amortiguador de los períodos de mayor régimen pluviométrico, garantizando así condiciones de humedad óptima para el desarrollo del fruto, sobre todo en la Etapa 2, y disminuyendo el excedente con el fin de limitar el desarrollo de patógenos (4). Se presentaron condiciones de nubosidad por encima de 18% de los valores normales en Naranjal, situación que a su vez se combinó con la reducción de las temperaturas máxima media (10). Esta situación implicó para Naranjal pasar de 5 h diarias de brillo solar (28) a 4 h, que sumados al efecto que se presentó en la reducción de la floración,

repercutió finalmente en una disminución de la producción. Lo que puede esperarse de los genotipos B997, B1160, B1027 y AY2557, es que en la medida que las condiciones ambientales mejoren, existirá una mejor respuesta en producción.

Las variables que influenciaron las respuestas en la EE Pueblo Bello, corresponden a los índices de DB y el DFe1 y tienen fuerte relación con los eventos de floración (6, 40, 50), y determina que más del 80% de la producción se registre en los últimos tres meses del año. Existe relación inversa entre el déficit de brillo solar y la cantidad de lluvia. Para la EE Pueblo Bello la época seca se registró con mayor intensidad en los primeros tres meses del año. El índice de DFe1 logra su mayor valor en estos meses, contrario a los valores registrados para el índice de la ATe1. La mayor cantidad de días con DBe1, indica una sobreoferta por efecto de cielo despejado. Puede deducirse, a partir de la información de clima, que aunque se presentaron condiciones de buena disponibilidad de agua posteriores a la floración, la que a su vez estuvo favorecida por la condición normal de tiempo seco en entre enero y marzo (10), la condición de cafcultura a la sombra limitó significativamente el potencial productivo, el cual puede reducirse en un 41% con niveles de sombra del 60% (21). En las condiciones antes mencionadas contrastan por su buen desempeño los genotipos B1096, B1047 y AX2342 con producciones de 2.875 kg.ha-año⁻¹ de cps.

Las EE El Tambo y El Rosario aunque contrastan en sus condiciones climáticas y en sus potenciales de producción, el análisis PLS determinó gran asociación de sus respuestas genotípicas con los índices de AT. La información de este índice en particular muestra mayor cantidad de días con AT inferiores a 10° C, situación que se traduce

en menor fluctuación de temperatura. En estudios realizados por Ramírez *et al.* (51), encontraron asociación entre las respuestas a floración en la EE Santander y el índice de AT, situación similar a la observada en los ambientes que conforman estas dos EE.

En la EE El Rosario las condiciones prevalecientes en el período analizado fueron de presencia de La Niña con valores superiores al histórico por encima del 32%, acentuado para el 2008, en el cual se registró reducción de la temperatura máxima media y media y disminución del brillo solar en cerca del 16% (10). Históricamente la AT en la EE El Rosario ha tenido un valor promedio de 8,5° C (32), situación que prevalece. Esa mayor cantidad de días con AT menores a 10 grados, favorecen el proceso fotosintético con superávit de energía, que puede destinarse a crecimiento, pues se reduce la fotorrespiración (42, 46). En condiciones normales de la EE El Rosario pueden expresarse mejores respuestas en producción, por su alto brillo solar, con un promedio anual de 2.048 h y que en el período de estudio fluctuó entre 2.000 y 1.720 h para los años 2007 y 2008, respectivamente (10).

La EE El Tambo, en la que la altitud representa un factor limitante, las temperaturas medias y máxima media son inferiores, con diferencia de un grado con respecto a la EE El Rosario, a su vez existió una diferencia de alrededor de 250 h de brillo solar entre las dos EE, situaciones que revierten las ventajas de un indicador como la AT. Otras situaciones que originaron que la producción no tuviera mejor expresión, estuvieron relacionadas con el alto régimen hídrico, con valores por encima de 21% en el año 2007 y 40% en el 2008 y el primer trimestre de 2009. No obstante, se mantuvieron los períodos de estrés hídrico responsables de la floración para la cosecha principal. La situación no fue mejor

para la oferta de número de días con brillo solar, que disminuyó en 10% y 20% para los años 2007 y 2008, respectivamente (10). Ambas EE comparten la mejor expresión de los genotipos B988, AX2383 y B1030, con producciones en la EE El Rosario que superan en 1,7 veces o más a la EE El Tambo, excepto en el genotipo B988 que su producción es equivalente. La EE Rosario, adicionalmente muestra interacción positiva con el genotipo B1322.

Puede concluirse que:

Las EE experimentales utilizadas en este estudio, relacionadas en torno a la capacidad de originar respuestas diferenciales en producción de los genotipos evaluados, se conforman en siete grupos. Los primeros seis de forma individual, constituidos por las EE El Tambo, Paraguaicito, La Trinidad, Santa Bárbara, El Rosario y Pueblo Bello, un grupo final que asociaría las EE de La Catalina y Naranjal. Por potencial de producción se conformarían tres niveles, el primero con potencial superior, relacionado con las EE El Rosario, Paraguaicito y La Trinidad; un nivel de expresión media conformado por las EE La Catalina y Naranjal y, un nivel de potencial inferior relacionado con las EE El Tambo, Pueblo Bello y Santa Bárbara.

Una consecuencia práctica de los resultados en este sentido, corresponde a la reestructuración de sitios destinados a investigación; para el caso de las EE de la FNC, bajo las consideraciones de este estudio, es posible, dada la similaridad de condiciones agroecológicas y de patrones de respuesta de los genotipos evaluados, definirles actividades estratégicas complementarias. Montagnon *et al.* (44), basados en la evaluación de varios clones de *Coffea canephora* en diferentes ambientes en Costa de Marfil, en los cuales se asoció su respuesta con las condiciones de suelo de

los sitios, encontraron que cuatro estaciones de investigación, representaban el mismo rango de variabilidad que las nueve que se incluyeron en el estudio.

Los indicadores bioclimáticos conforman a su vez cinco grandes grupos, que se relacionan positivamente con las respuestas genotípicas en las EE. Un primer grupo relacionado con indicadores de TT, DFe3 y DFe0, que influyen la mayor parte de los efectos de la EE Paraguaicito. Un segundo grupo conformado por indicadores de DB, DFe1 y DFe2, asociados en su respuesta con las EE Pueblo Bello y El Rosario. Un tercer grupo relacionado con la AT, que definen expresiones diferenciales de los genotipos en ambientes de las EE El Rosario, La Trinidad y El Tambo. Un cuarto grupo que se asocia al indicador de DM y se relaciona directamente con las respuestas en el grupo ambiental conformado por las EE La Catalina y Naranjal. Los indicadores PPe2 y DMe0 se ubican de manera indiferente en localidades de las EE Rosario, Santa Bárbara y Paraguaicito.

En cuanto a las relaciones entre las respuestas de interacción y conforme a la secuencia de análisis, dadas las coincidencias, puede confirmarse la afinidad de los siguientes genotipos con las EE en las cuales se registró el mejor comportamiento estacional (Tabla 10).

El grupo de genotipos propuestos en cada EE tendrían un potencial productivo por año así: para las EE El Tambo presentan una media de 3.625 kg.ha⁻¹ de cps, superior en 35% a la media de la EE. Los genotipos seleccionados en la EE Paraguaicito presentan un potencial medio entre 5.125 y 7.500 kg.ha⁻¹ de cps, superior entre 9% y 27% a la media del ambiente en los experimentos A y B. Los genotipos propuestos para el ambiente integrado por las EE La Catalina

Tabla 10. Conformación de grupos ambientales y adaptación específica de genotipos en la Zona Cafetera Colombiana.

Ambiente	Genotipo o Familia
Pueblo Bello	B1096, AX2342, B1047
El Rosario	CU1815, CU1812, CX2866, DG0812, BH1247, B1030, B1322, AX2383, B988
Naranjal y La Catalina	BI0712, BH0813, CX2708, B997, B1160
La Trinidad	CU1812, CU1815, CX2866.
Paraguaicito	DG0812, BI0712, CU1815, B1047, B1160, B997
El Tambo	B988, B1030, AX2383

y Naranjal estiman una media que fluctúa entre 4.375 y 4.625 kg.ha⁻¹ de cps, que superaría de 25% a 29% el promedio del ambiente combinado en los experimentos A y B, respectivamente. La EE El Rosario, al incluir los genotipos propuestos, alcanzaría 5.875 kg.ha⁻¹ de cps y superaría la media de su ambiente en 32%. La EE Pueblo Bello tendría un potencial de 3.000 kg.ha⁻¹ de cps en promedio, 13% por encima de la media de su ambiente. En la EE La Trinidad los genotipos alcanzarían 5.850 kg.ha⁻¹ de cps, superior en 20% al del ambiente.

En el caso de la Variedad Castillo® Pueblo Bello, hoy cuenta con la representación en dos de las tres familias propuestas, por lo cual podría adicionársele el genotipo DT205 de la familia AX2342 y aumentar a cinco progenies la composición actual. La Variedad Castillo® El Rosario, cuenta hoy en su conformación con 11 genotipos, cuatro de los cuales se mencionan como candidatos; a partir de los resultados de este estudio, cuatro genotipos adicionales pueden complementar la mezcla así: DG0812, CU1784 (Familia B988), CU1871-75 (Familia B1030), CX2197 (Familia B1322), DT29 (Familia AX2383). La Variedad Castillo® Naranjal, constituida con 11 genotipos, tiene posibilidades de aumentarse en cuatro más, BI0712, BH0813, CX2708 y CU1903 (Familia B1160). Once genotipos constituyen la Variedad Castillo® Paraguaicito, tres de ellos dentro de los

propuestos para complementarla; de esta forma a la variedad se le adicionarían los genotipos DG0812, CX2848 (Familia B1047) y CU1903 (Familia B1160). La Variedad Castillo® La Trinidad ratifica los genotipos que hoy la constituyen. A los genotipos que actualmente constituyen La Variedad Castillo® El Tambo se le pueden adicionar los genotipos CU1784 (Familia B988), CU1871-75 (Familia B1030) y DT29 (Familia AX2383), que también fueron propuestos en La Variedad Castillo® El Rosario, por compartir la respuesta sobre indicadores agroclimáticos similares.

Los rangos de la producción potencial estuvieron relacionados con las condiciones de clima que prevalecieron durante el desarrollo de los experimentos, el caso más crítico le correspondió al Experimento B, realizado en condiciones de La Niña, en la otra investigación se combinaron los eventos La Niña, Neutro y El Niño, los cuales favorecieron el desempeño de los genotipos. Lo anterior demuestra que los genotipos en cada condición mostraron grados de adaptación que los candidatizan para hacer parte de las variedades regionales.

Las situaciones descritas con anterioridad evidencian la estabilidad que se lograría en la producción, cuando se conforman mezclas, en la cual actúa un amortiguamiento poblacional (1). En el presente caso, una propuesta de conformación de grupos de genotipos con adaptación general y específica fortalecerá

la dinámica de las Variedades Castillo® Regionales (3).

El análisis anterior, aunque muestra asociación de las variables ambientales con las expresiones fenotípicas de los materiales evaluados en cada EE, ellas no actúan solas, como pudo observarse en la discusión, otras variables limitaron o actuaron sinérgicamente con la variable ambiental predominante. El análisis de otros experimentos que incluyan igualmente genotipos estables y ambientes específicos contrastantes con los evaluados en este estudio, permitirá observar la dinámica de las variables ambientales y su efecto en las respuestas diferenciales de los genotipos, lo cual dará una mejor visión de las dinámicas propias de éstos cuando se someten a condiciones cambiantes de clima.

Las metodologías de análisis aquí utilizadas, son complementarias y, en conjunto, permiten realizar una mejor discusión de los resultados con mayor soporte estadístico. Es apenas lógico que en la medida que se integren a las evaluaciones mayor número de expresiones fenológicas y covariables de clima o de suelo, puede darse mayor soporte en las metodologías de análisis, lo que redundará en mayor precisión y confiabilidad de las respuestas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los Coordinadores de las EE de Cenicafé y las personas que estuvieron a cargo del desarrollo agronómico y registro información en el campo. Al técnico Jairo Jaramillo por la consolidación de los datos, a la disciplina de Agroclimatología por facilitar la información histórica

de clima consolidada y revisada. A los investigadores Víctor Hugo Ramírez y Andrés J. Peña, por su asesoría en la construcción de los indicadores bioclimáticos y en la interpretación de sus respuestas al constituirse como covariables ambientales.

LITERATURA CITADA

1. ALLARD, R.; BRADSHAW, A. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. *Crop science* 4:503-508. 1964.
2. ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma : FAO, 1998. 301 p.
3. ALVARADO, G.; POSADA, H.; CORTINA, H. Las variedades Castillo ® regionales: Variedades de café (*Coffea arabica* L.) con alta productividad, elevada resistencia a enfermedades y adaptación específica. *Fitotecnica colombiana* 8(1):22-38. 2008.
4. ARCILA P., J. Factores que determinan la productividad del cafetal. p. 61-86. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná : CENICAFÉ, 2007. 309 p.
5. ARCILAP., J.; BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. Application of the "Extended BBCH - Scale" for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* sp.). *Chinchina : Cenicafé*, 2001. 32 p.
6. ARCILA P., J.; JARAMILLO, A. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. *Chinchiná : Cenicafé*, 2003. 8 p. (*Avances Técnicos* No. 311).
7. ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; BALDIÓN, J.; BUSTILLO, A. La floración del café y su relación con el control de la broca. *Chinchiná : Cenicafé*, 1993. 6 p. (*Avances Técnicos* No. 193).
8. BAKER, R.J. Tests for crossover genotype-environmental interactions. *Canadian journal of plant science* 68(2):405-410. 1988.
9. BALALIC, I.; ZORIC, M.; CRNOBARAC, J. Interpretation of interactions in sunflower agronomic trials using multiplicative models and climatic information. *Helia* 31(49):51-64. 2008.

10. BALDIÓN, J.; JARAMILLO, A.; GUZMÁN, O. Comportamiento del clima durante el período enero/2007 - junio/2009 en la zona cafetera colombiana. Chinchiná : Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2009. 47 p.
11. BECKER, H.C. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30(3):835-840. 1981.
12. BORÉM, A.; VIEIRA, G. Melhoramento de plantas. 4a. ed. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 2005.
13. CAMARGO, A.; CAMARGO, M. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia* 60(1):65-68. 2001.
14. CAMARGO, M.; ROLIM, G.; SANTOS, M. Modelagem agroclimatológica do café: Estimativa e mapeamento das produtividades. *Informe agropecuario* 28(241):58-65. 2007.
15. CAMAYO, G.; CHAVES, B.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A. Desarrollo floral del cafeto y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 54(1):35-49. 2003.
16. CARAMORI, P.; FILHO, A.; MORAIS, H.; FILHO, F.; DUQUIA, C. Sistema de aleta pars geadas na cafeicultura do Paraná. *Informe agropecuario* 28(241):66-71. 2007.
17. CARVALHO, H.; MELO, B.; RABELO, P.; SILVA, C.; CAMARGO, R. Índices bioclimáticos para a cultura de café. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental* 15(6):601-606. 2011.
18. CROSSA, J.; VARGAS, M.; VAN E, F.; JIANG, C.; EDMÉADES, G.; HOISINGTON, D. Interpreting genotype x environment interaction in tropical maize using linked molecular markers and environmental covariables. *Theoretical and applied genetics* 99:611-625. 1999.
19. DAMATTA, F.; RONCHI, R.; MAESTRI, M.; BARROS, R. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian journal of plant physiology* 19(4):485-510. 2007.
20. DODIG, D.; ZORIC, M.; KNEZEVIS, D.; DIMITRJEVIC, B.; ŠURLAN M., G. Assessing wheat performance using environmental information. *Genetika* 39(3):413-425. 2007.
21. FARFÁN, F.F.; MESTRE, A. Fertilización del café en un sistema agroforestal en la zona cafetera del norte de Colombia. *Cenicafé* 55(3):232-245. 2004.
22. FNC. Productores y cultivo de café en Colombia. [En línea]. Bogotá : La Federación, (s.f.). Disponible en internet: [Http://sales.cafedecolombia.com/irj/portal](http://sales.cafedecolombia.com/irj/portal). Consultado el 21 de Mayo de 2012.
23. FNC. Producción y exportaciones de café de Colombia siguen creciendo - Feb 2015. [En línea]. Bogotá : La Federación, (s.f.). Disponible en internet: [Http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/](http://www.cafedecolombia.com/cci-fnc-es/index.php/comments/). Consultado el 6 de Octubre de 2015.
24. GABRIEL, K.R. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58(3):453-467. 1971.
25. GAUCH, H., JR. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Amsterdam : Elsevier science, 1992.
26. GÓMEZ, L.; CABALLERO, A.; BALDIÓN, J. Ecotopos cafeteros de Colombia. Bogotá : FNC, 1991. 131 p.
27. GÓMEZ, L.; GUZMÁN, O. Relación empírica entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafe, Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 46(4):205-218. 1995.
28. GUZMÁN, O.; GÓMEZ, L. Caracterización del brillo solar en Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 48(1):26-39. 1997.
29. JARAMILLO, A. Balance hídrico de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 33(1):15-28. 1982.
30. JARAMILLO, A. Climatología de las regiones cafeteras: Microclima y fenología del cultivo del café. Chinchiná : Cenicafe : FNC, 1999. 156 p.
31. JARAMILLO, A. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. Manizales : Cenicafe, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 262).
32. JARAMILLO, A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná : FNC : Cenicafe, 2005.
33. JARAMILLO, A. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé* 57(4):282-298. 2006.
34. JARAMILLO, A.; ARCILA, J. Épocas recomendables para la siembra de los cafetos. Manizales : Cenicafe, 1996. 8 p. (Avances Técnicos No. 229).

35. JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Interceptación de lluvia en un bosque y en plantaciones de *coffea Arabica* L. *Cenicafé* 49(2):129-135. 1998.
36. JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*coffea Arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2):97-105. 1999.
37. JARAMILLO, A.; GUZMÁN, O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *coffea Arabica* L., variedad caturra. *Cenicafé* 35(3):57-65. 1984.
38. JARAMILLO, A.; GÓMEZ, O. Desarrollo de una aplicación de cómputo para el cálculo de balance hídrico en cafetales. Chinchiná : *Cenicafé*, 2002.
39. JARAMILLO, A.; RAMÍREZ, V.; ARCILA, J. Distribución de la lluvia, clave para planificar las labores en el cultivo del café en Colombia. Chinchiná : *Cenicafé*, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 411).
40. JARAMILLO, A.; VALENCIA, G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L., en Chinchiná, Colombia. *Cenicafé* 31(4):127-143. 1980.
41. KROONENBERG, P. Introduction to biplots for GxE tables. Brisbane : University of Queensland, 1997.
42. LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.; PONS, T. Plant physiological ecology. New York : Springer, 1998.
43. MEIRELES, E.; VOLPATO, M.; ALVES, H.; VIEIRA, T. Zoneamento agroclimático: Um estudo de caso para o café. *Informe agropecuario* 28(241):50-57. 2007.
44. MONTAGNON, C.; CILAS, C.; LEROY, T.; YAPO, A.; CHARMETANT, P. Genotype-location interactions for *coffea Canephora* yield in the Ivory coast. *Agonomie* 20(1):101-109. 2000.
45. MONTOYA, E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; RIAÑO, N.; QUIROGA, F. Modelo para simular la producción potencial del café en Colombia. Manizales : *Cenicafé*, 2009. 52 p. (Boletín Técnico No. 33).
46. MOSQUERA, L.; RIAÑO, N.; ARCILAP, J.; PONCE, C. Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea* sp. *Cenicafé* 50(3):215-211. 1999.
47. NUNES, F.; CAMARGO, M.; FAZUOLI, L.; ROLIM, G.; PEZZOPANE, J. Modelos agrometeorológicos de estimativa da duração do estágio floração-maturação para três cultivares de café arábica. *Bragantia* 69(4):1011-1018. 2010.
48. PEZZOPANE, J.; PEDRO J., M.; CAMARGO, M.; FAZUOLI, L. Exigencia térmica do café arábica CV. Mundo novo no subperíodo florescimento - colheita. *Ciencia e agrotecnologia* 32(6):1781-1786. 2008.
49. PING, J.; GREEN, C.; BRONSON, K.; ZARTMAN, R.; DOBERMANN, A. Identification of relationships between cotton yield, quality, and soil properties. *Agronomy journal* 96(6):1588-1597. 2004.
50. RAMÍREZ, V.; JARAMILLO, A.; ARCILA, J. Rangos adecuados de lluvia para el cultivo de café en Colombia. Manizales : *Cenicafé*, 2010. 8 p. (Avances Técnicos No. 395).
51. RAMÍREZ, V.; ARCILA P., J.; JARAMILLO, A.; RENDÓN, J.; CUESTA, G.; MENZA, H. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61(2):132-158. 2010.
52. REYNOLDS, M.; TRETOWAN, R.; CROSSA, J.; VARGAS, M.; SAYRE, K. Physiological factors associated with genotype by environment interaction in wheat. *Field crops research* 85:253-274. 2004.
53. RIAÑO, N.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; CHAVES, B. Acumulación de materia seca y extracción de nutrientes por *Coffea arabica* L. cv. Colombia, en tres localidades de la zona cafetera central. *Cenicafé* 55(4):265-276. 2004.
54. ROMAGOSA, I.; FOX, P.N. Genotype x environment interaction and adaptation. p. 373-390. En: HAYWARD, M.D.; BOSEMARK, N.O.; ROMAGOSA, T. *Plant breeding: Principles and prospects*. London : Chapman and Hall, 1993.
55. SANTOS, M.; CAMARGO, M. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro. *Bragantia* 65(1):173-183. 2006.
56. SAS. Statistical software: SAS/STAT Version 9.2. *North Carolina* : SAS Institute : Cary, 2012.
57. SILVA F., E.; SANTOS, B.; EVANGELISTA, E.; ASSAD, H.; PINTO, J.; ZULLO, O., JR.; CORAL, G. Delimitação das áreas aptas do ponto de vista agroclimático para o plantio da cultura do café (*Coffea arabica*) no estado de Goiás. p. 123-125. [Brasília] : Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil : Embrapa, 2000.

58. TROJER, H. El ambiente climatológico y el cultivo del café en Colombia: Problemas, conocimientos actuales y perspectivas. *Cenicafé* 5(57):22-37. 1954.
59. TROJER, H. The phenological equator for coffee planting in Colombia. París : Agrometeorological methods proceedings of the reading symposium, 1968.
60. VALLEJO C., F.; ESPITIA C., M.; ESTRADA S., E.; RAMÍREZ, H. Genética vegetal. Palmira : Universidad Nacional de Colombia, 2010.
61. VANE., F. Genotype by environment interaction: Basics and beyond. p. 156-170. En: LAMKEY, K.; LEE, M. Plant breeding. Iowa : Blackwell, 2006.
62. VARGAS, M.; ALVARADO, G. Memorias curso de análisis e interpretación de diseños experimentales y diseños genéticos aplicados al mejoramiento de plantas. Palmira : CIAT : CIMMYT, 2011.
63. VARGAS, M.; CROSSA, J. El análisis AMMI y la gráfica Biplot en SAS. Mexico : CIMMYT, 2000. 42 p.
64. VARGAS, M.; CROSSA, J.; VAN E., F.; RAMÍREZ, M.E.; SAYRE, K. Using partials least squares, factorial regression and AMMI models for interpreting genotype x environment interaction. *Crop science* 39(4):955-967. 1999.
65. VARGAS, M.; CROSSA, J.; VAN E., F.; SAYRE, K.; REYNOLDS, M. Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. *Agronomy journal* 93(4):949-960. 2001.
66. VELÁSQUEZ, S.; JARAMILLO, A. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* 60(2):148-160. 2009.
67. WILLIAMS, C.; LIEBMAN, M.; EDWARDS, J.; JAMES, D.; SINGER, J.; ARRIT, R. Patterns of regional yield stability in association with regional environmental characteristics. *Crop science* 48(4):1545-1559. 2008.
68. YAN, W.; KANG, M. GGE biplot analysis, a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. London : New York, 2003.