

# Factores que determinan la productividad del cafetal

Jaime arcila Pulgarín.



## La productividad agrícola

### Producción vegetal y niveles de productividad

El potencial de producción de materia seca está determinado por la genética de la planta o variedad y por su interacción con el ambiente (suelo y clima), así como por las prácticas de cultivo.

La producción es la parte de la planta utilizable y se mide como la cantidad de grano o de materia seca. Cuando esta producción se relaciona con los recursos utilizados para su obtención se utiliza el concepto de productividad.

Existen diferentes niveles de productividad agrícola, de acuerdo a la cantidad de factores limitativos que se encuentren en el proceso (Figura 3.1). Cuando las condiciones son ideales, se obtiene la máxima producción posible o producción potencial, que correspondería a la producción obtenida con el mejor nivel de tecnología y material biológico disponible, bajo un manejo ideal y en un ambiente físico óptimo para la interacción de los factores determinantes de la producción. Sin embargo, en la práctica existe una

serie de factores limitativos como por ejemplo, la disponibilidad de agua y de nutrientes, que impiden alcanzar la producción potencial y sólo permiten la obtención de una producción alcanzable de acuerdo a la proporción de elementos disponibles para el cultivo.

Así mismo, existen otros factores que actúan como reductores, entre ellos se encuentran las arvenses, las plagas y las enfermedades, entre otros, que en situaciones específicas sólo permiten alcanzar una producción actual determinada por la eficacia de las medidas de protección que aplique el agricultor.

El concepto del factor limitante o Ley del mínimo Justus Von Liebig (1862) definió que la producción de la planta se reduce cuando el nivel óptimo de uno de los factores que incide en su crecimiento se encuentra en menor cantidad, con respecto a la cantidad adecuada para ese factor. No obstante, también puede ocurrir un desbalance en el crecimiento o la producción de la planta debido al incremento de un factor no limitante.

De acuerdo con la Tabla 3.1, existen más de 50 factores que afectan el crecimiento del cultivo y el potencial de producción. Aunque el productor no puede controlar el efecto de los factores climáticos, la mayoría de aquellos asociados al suelo y al cultivo pueden y deben

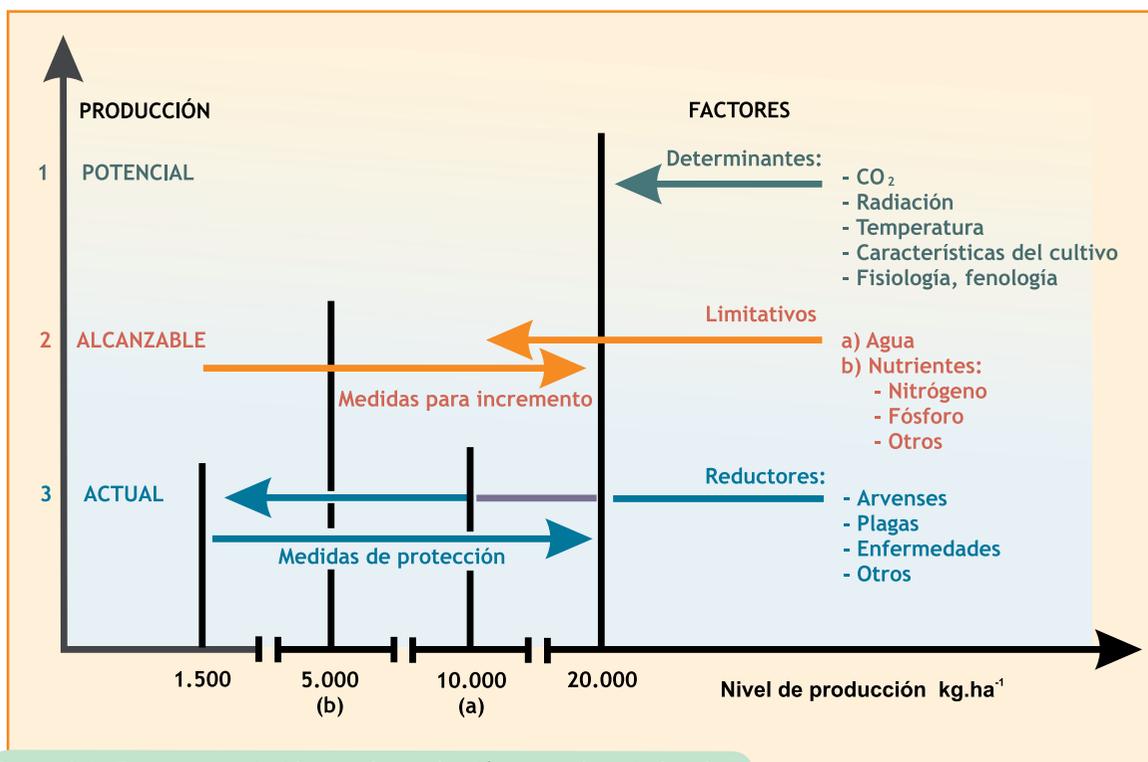


Figura 3.1. Factores que inciden en la producción vegetal y niveles de productividad alcanzados de acuerdo con las prácticas de cultivo.

**Tabla 3.1.** Factores que afectan el potencial de producción de un cultivo (Havlin *et al.*,1999).

Factores climáticos y geográficos	Factores del suelo	Factores del cultivo
Precipitación (cantidad y distribución) Temperatura del aire Humedad relativa Luz (cantidad, intensidad y duración) Viento (velocidad, distribución) Concentración de CO <sub>2</sub> Altitud Latitud	Contenido de materia orgánica Textura Estructura Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Saturación de bases Pendiente y topografía Temperatura del suelo Factores de manejo del suelo (arado, drenaje, otros) Profundidad efectiva Fertilidad del suelo	Especie y variedad Calidad de la semilla Fecha de siembra Densidad de siembra y su geometría Evapotranspiración Disponibilidad hídrica Nutrición Plagas y enfermedades Eficiencia de cosecha

ser manejados para alcanzar máximas productividades. Dos de los factores que más influyen sobre la producción potencial de las plantas son: 1) la cantidad de agua disponible durante el ciclo de desarrollo y 2) la duración de dicho ciclo.

Para altas producciones, los factores controlables y no controlables deben operar en armonía, ya que muchos se relacionan entre sí; por ejemplo, la interacción de aquellos que influyen en la producción potencial puede incrementar o disminuir el crecimiento de la planta o la producción.

El desafío de un productor o asesor técnico es identificar en forma precisa todos los factores limitantes y eliminar o minimizar la influencia de aquellos que pueden manejarse.

En general, todos los agricultores exitosos usan el principio de la Ley del Mínimo, consciente o inconscientemente. Por ejemplo, un productor puede haber sembrado la variedad correcta en el momento

oportuno, con la densidad apropiada y haber aplicado la cantidad de fertilizante necesaria, y aún así no alcanzar la máxima producción potencial, porque el agua disponible para la planta era el factor más limitante.

## Factores determinantes de la productividad del cafetal

La productividad del cafetal definida como kilogramos de café pergamino seco (kg cps) obtenidos por unidad de recurso utilizado en su producción, depende de la cantidad de efectos positivos que produzcan en la planta diferentes factores ambientales y las prácticas de manejo.

Como se observa en la Figura 3.2, la productividad del cafetal comienza a determinarse por la calidad del sitio donde se siembre el cafetal (condiciones de suelo y clima), y de acuerdo al grado de adaptación,



**Figura 3.2.** Factores y prácticas determinantes de la productividad del cafetal.

potencialidad y estabilidad productiva de la variedad utilizada (variedades de porte alto o porte bajo).

Así mismo, la densidad de siembra (número de plantas/ha) y la edad de la plantación (renovación oportuna) son factores que inciden directamente en la productividad (Duque y Bustamante, 2002) (Figura 3.2).

La eficiencia del proceso productivo se verá favorecida también por la oportunidad y pertinencia de las prácticas de administración relacionadas con el control de arvenses, plagas y enfermedades, y el suministro de los nutrimentos esenciales necesarios. Finalmente, las buenas prácticas de cosecha y beneficio complementan el proceso y la obtención de la calidad óptima del producto para el consumidor.

La interacción de este conjunto de factores y opciones tecnológicas constituye lo que denominamos sistema de producción. Por consiguiente, existe una amplia gama de sistemas de producción de café: intensivo, extensivo, de subsistencia, campesino, empresarial, a plena exposición solar, sistemas agroforestales y orgánicos, entre otros. El conjunto de prácticas que se establecen en los cafetales con la finalidad de mantener a través del tiempo una producción estable y por un tiempo indefinido, se constituyen en la administración del cafetal.

## Factores climáticos que intervienen en la productividad del cafetal

Cada región posee características climáticas que conducen a un comportamiento específico de la planta y determinan su productividad de acuerdo a la oferta (Jaramillo, 2005).

De los factores ambientales, la disponibilidad de energía y agua juegan un papel importante en la producción, a través de su implicación en los procesos físicos y bioquímicos necesarios para el crecimiento y el desarrollo de la planta (Ritchie, 1991) (Figura 3.3).

**Disponibilidad de energía.** La energía solar es importante para la vida vegetal por sus efectos térmicos y por su papel en el proceso fotosintético, en el cual parte es usada en la síntesis de compuestos de alta energía y compuestos carbonados. Además, por sus efectos morfogénicos, ya que la cantidad, la intensidad y la distribución espectral de la radiación de onda corta juega un papel importante en la regulación del crecimiento y el desarrollo, y también, porque la radiación de longitud de onda muy corta y altamente energética puede tener efectos nocivos sobre la estructura del material genético, causando mutaciones (Taiz y Zeiger, 2002; Jones, 1989).

**Radiación solar.** Al límite superior de la atmósfera terrestre llega una cantidad aproximadamente constante de energía con un valor cercano a  $1.370 \text{ Wm}^{-2}$  ( $1,96 \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ), denominado constante solar; sin embargo, la cantidad de radiación recibida en la superficie de la tierra es apenas  $\frac{1}{4}$  de ese valor (aproximadamente  $342 \text{ Wm}^{-2}$ ) debido a la filtración que sufre en su paso a través de la atmósfera, la cual absorbe y dispersa mucha parte de esa radiación (Jaramillo, 2005).

En una localidad y una época del año determinada, la cantidad de radiación que llega a la superficie sufre modificaciones de acuerdo con la nubosidad, la latitud, la altitud y la orientación de las laderas; de ahí que aproximadamente sólo el 45% de ésta ( $154 \text{ Wm}^{-2}$ ) llega hasta los 1.800 m y según la nubosidad, entre el 24 y el 50% alcanza el nivel del mar (Corley, 1983; Jones, 1989).



Figura 3.3. Factores ambientales que inciden en la producción vegetal (Ritchie, 1991).

Colombia se encuentra cerca de la línea ecuatorial y por tanto, recibe abundante radiación solar durante todo el año. Los valores máximos que llegan al tope de la atmósfera se presentan en marzo y septiembre, y están próximos a 432 Wm<sup>-2</sup>. Los mínimos se observan entre diciembre y enero, y están próximos a 384 Wm<sup>-2</sup>. Por efectos del relieve hay regiones más expuestas a los rayos del sol que otras. En regiones de montaña, por restricción del horizonte, el número efectivo de horas de brillo solar diario puede disminuir en dos o más horas (por ejemplo regiones cafeteras situadas en valles profundos) (Jaramillo, 2005).

En la Tabla 3.2 se presentan los valores de la radiación observada para varias localidades de la zona cafetera colombiana, los cuales oscilan entre 170 y 220 Wm<sup>-2</sup>, atenuándose el 50% o más, con respecto a la radiación posible (Jaramillo, 2005). Esta energía disponible constituye el primer elemento importante para la realización del potencial de producción del café en la zona cafetera colombiana.

**Temperatura.** Las características térmicas de varias localidades de la zona cafetera (Tabla 3.2), son afectadas

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS:** El café es una planta que en su ambiente original se encontró en el sotobosque, por lo que es una planta que se adapta a la sombra. Sin embargo, en los periodos lluviosos o en las regiones de alta precipitación, la radiación es baja y puede ser limitativa para la productividad del café, por sus efectos en la planta como una mayor elongación de tallos y ramas o menor diferenciación de nudos, menor número de flores o menor actividad fotosintética.

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** En temperaturas altas la planta no puede acumular suficiente materia seca por: aumento de la resistencia interna al flujo de CO<sub>2</sub>, cierre de estomas, excesivo consumo de energía en el proceso respiratorio o baja eficiencia en el uso del agua. Además, pueden ocurrir anomalías florales, como flores estrella o secamiento de yemas, lesiones en la base del tallo o lesiones en los cloroplastos. El ciclo de desarrollo de la planta es más corto y la duración del cultivo es menor. En temperaturas bajas, el proceso de acumulación de materia seca disminuye, y por consiguiente, el crecimiento es muy lento.

**Tabla 3.2.** Características de la disponibilidad de energía radiante y térmica en sitios representativos de la zona cafetera colombiana (Adaptado de Jaramillo, 2005).

Depto	Estación	Latitud N	Longitud W	Altitud m	Brillo solar horas/año	Brillo solar horas/día	Radiación Astronómica Incidente Wm <sup>-2</sup>	Radiación observada Wm <sup>-2</sup>	RFA Wm <sup>-2</sup>	Temperatura (°C) temperatura			
										Min	Med	Max	Amplitud Térmica
Nariño	Ospina Pérez	1° 15'	77° 29'	1.603	1.694	5,0	286,4	197,5	96,8	15,0	18,9	24,6	9,6
Cauca	La Florida	2° 29'	76° 34'	1.851	1.769	4,9	283,0	195,2	95,6	12,9	17,5	24,3	11,4
Huila	J. Villamil	2° 20'	75° 31'	1.420	1.314	3,6	249,7	172,2	84,4	16,1	19,4	23,8	7,7
Quindío	La Bella	4° 30'	75° 40'	1.449	1.415	3,6	249,3	171,9	84,2	15,1	19,6	26,4	11,3
Caldas	Cenicafé	5° 00'	75° 36'	1.310	1.829	5,3	292,2	201,5	98,7	16,5	20,8	27,4	10,9
Tolima	Libano	4° 55'	75° 03'	1.514	1.796	4,9	282,0	194,5	95,3	15	19	23,4	8,5
Antioquia	E. Jaramillo	5° 58'	75° 42'	1.495	2.051	5,9	307,1	211,8	103,8	15,9	19,7	23,4	8,5
N. Santander	Blonay	7° 34'	72° 37'	1.235	1.365	4,4	268,3	185,0	90,7	15,4	19,7	26	10,6
Cesar	Pueblo Bello	10° 25'	73° 34'	1.000	2.147	6,7	324,5	223,8	109,7	15,4	20,7	27,1	11,7

por la altitud y la latitud; por tanto, al aumentar la altitud la temperatura desciende, mientras que al aumentar la latitud ésta disminuye (Jaramillo, 2005).

En diferentes investigaciones se ha encontrado que la temperatura óptima para el crecimiento del café está entre 19 y 21°C, con un límite inferior de 13°C y uno superior de 32°C. Por fuera de estos límites el crecimiento es casi nulo y la productividad muy baja (López *et al.*, 1972). En general, la temperatura media es muy uniforme a través del año pero existen grandes diferencias entre la temperatura máxima y mínima diarias. En promedio, la oscilación térmica en la zona cafetera es de 9 a 10°C.

**Disponibilidad de agua.** En las zonas cafeteras colombianas más importantes por su producción, la precipitación alcanza valores entre 2.000 y 2.500 mm. En general ocurren en éstas, dos períodos secos y dos lluviosos en el año y los volúmenes anuales de evaporación son inferiores a 1.200 mm. No obstante, existen zonas con limitaciones de agua por una inadecuada distribución de lluvias o por la alta evaporación. Igualmente, hay limitaciones para el cultivo por exceso de lluvia, especialmente en aquellas zonas con suelos que tienen alta capacidad de retención de agua (Tabla 3.3) (Jaramillo, 1982, 2005). La disponibilidad de agua es también influenciada por

la latitud y la altitud. La región Sur (1° latitud Norte) presenta un período marcadamente seco entre junio y septiembre y una estación lluviosa entre octubre y junio. En la región central (3 a 6° latitud Norte) hay dos períodos lluviosos, de marzo a junio y septiembre a diciembre, y dos períodos menos lluviosos entre enero-febrero y julio-agosto. La región Norte (10° latitud Norte) presenta una estación seca pronunciada de diciembre a marzo y una lluviosa de mayo a noviembre. Entre los 1.300 y 1.500 m de altitud ocurren las máximas precipitaciones. Por encima de 1.500 m la precipitación tiende a disminuir y por debajo de los 1.300 m, la precipitación tiende a aumentar (Jaramillo, 2005).

Esta distribución de lluvias es en alto grado responsable de los volúmenes y la relación porcentual de las floraciones semestrales y de los patrones de distribución de la cosecha (Trojer, 1968).

Las características de los factores considerados son adecuadas para cafetales establecidos a plena exposición solar. El cultivo por fuera de estas condiciones puede ser ineficiente desde el punto de vista del proceso fotosintético y necesitará de arreglos especiales como el establecimiento de sombrío, que permitirán volúmenes de producción aceptables aunque bajos, o en otros casos, el riego, que lo harán más costoso.

**Tabla 3.3 .** Características de la disponibilidad de agua en sitios representativos de la zona cafetera colombiana (Jaramillo, 2005).

Depto	Estación	Precipitación (mm)													Balance hídrico			
		E	F	M	A	My	J	Jl	A	S	O	N	D	Total año	EP	ER	Exceso	Déficit
Nariño	Ospina Pérez	108	103	125	174	149	87	46	51	82	184	189	142	1.440	1.203	1.114	326	89
Cauca	La Florida	130	157	151	198	154	131	85	80	111	219	251	256	1.923	1.179	1.169	754	10
Huila	J. Villamil	69	93	120	155	141	118	90	68	76	150	133	106	1.319	1.251	1.197	122	54
Quindío	La Bella	134	164	187	268	206	112	64	85	135	294	315	221	2.185	1.248	1.221	964	27
Caldas	Naranjal	151	158	202	312	317	223	187	207	206	305	269	174	2.711	1.294	1.294	1.417	0
Tolima	Libano	104	145	204	279	262	151	115	128	204	310	260	161	2.323	1.248	1.248	1.075	0
Antioquia	El Rosario	86	96	143	273	328	239	190	231	275	326	242	142	2.571	1.237	1.233	1.338	4
N. Santander	Blonay	54	61	74	185	170	97	74	89	140	239	229	105	1.517	1.316	1.228	466	88
Cesar	Pueblo Bello	22	32	51	147	274	220	147	241	277	345	224	53	2.033	1.388	1.172	897	216

EP= Evaporación potencial; ER= Evaporación real

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** No existe el ambiente ideal para un cultivo (condiciones óptimas). Cada ambiente posee alguna limitación y la buena administración del cafetal consiste en identificar estas limitaciones para determinar su efecto sobre la eficiencia de la planta y la productividad del sistema de producción, y de esta forma establecer las prácticas adecuadas de manejo del cultivo para superarlas.

Según las características hidrológicas dentro de los cafetales, en las regiones con periodos secos muy prolongados no conviene establecer cultivos en altas densidades de siembra, tanto para el café como para el sombrío, debido a que se aumenta la cantidad de agua interceptada por la parte aérea de las plantas, disminuyendo la cantidad que llega a la superficie del suelo. El sombrío siempre se requiere en regiones secas con suelos de baja retención de humedad y bajo contenido de materia orgánica. En las regiones húmedas con brillo solar entre 1.600 y 1.800 horas al año, sin periodos secos marcados, sería más recomendable el empleo de arreglos de siembra rectangulares y distancias de siembra más amplias, en busca de mayor evaporación, por lo que no es necesario el uso del sombrío.

La disponibilidad hídrica es igualmente importante para determinar el momento oportuno para la ejecución de algunas prácticas de cultivo. Por ejemplo, las siembras y la fertilización se recomienda efectuarlas en épocas húmedas, mientras que la renovación por zoca es más conveniente en las épocas secas.

## Factores edáficos que inciden en la productividad del cafetal

**El crecimiento óptimo del cultivo depende también del crecimiento óptimo de la raíz.** Cuando el suelo tiene buenas condiciones físicas y químicas, las raíces son largas, profundas y se expanden en el suelo, lo cual posibilita un amplio suministro de los nutrimentos y el agua requeridos por la planta (Suárez de Castro, 1953).

**Características físicas y químicas de los suelos cafeteros colombianos.** Los suelos de la zona cafetera colombiana son relativamente jóvenes, es decir, todavía están en proceso de desarrollo y según la naturaleza del material petrográfico del cual se derivan, han sido agrupados dentro de las siguientes clases: metamórficos, ígneos y sedimentarios, y sobre ellos existen diferentes grados y patrones de cubrimiento de cenizas volcánicas. Estos suelos son altamente variables en sus características debido a su distribución en la zona cafetera, por su ubicación sobre distintos tipos de relieve, desde plano o ligeramente ondulado hasta abrupto con valores de pendiente superiores al 75%. En estos suelos también varían las condiciones físicas (desde pedregosos y arenosos hasta francos y arcillosos) y químicas (contenidos bajos a altos de materia orgánica y minerales esenciales) (Tabla 3.4) (Grisales, 1977, Quevedo, 1986, Gómez *et al.*, 1991).

**Condiciones físicas.** La condición física del suelo tiene un papel importante en el vigor del cultivo y en última instancia, la producción dependerá en gran parte de la calidad de la relación suelo - aire - agua - temperatura. Estos factores físicos combinados con la cantidad y estado de la materia orgánica del suelo, afectan el desarrollo radical de la planta y por ende, la capacidad de absorción de nutrimentos, la colonización

de la raíz por organismos benéficos o perjudiciales, y los procesos fisiológicos de la planta (Havlin *et al.*, 1999).

Un suelo con buena condición física se caracteriza porque posee una humedad adecuada, es suelto, con macroporos bien interconectados que permiten un rápido acceso de las raíces, el aire y el agua. Así mismo, este suelo debe mantener la temperatura adecuada para que ocurra un crecimiento y funcionamiento fisiológico óptimo de las raíces (Havlin *et al.*, 1999).

**Textura y estructura.** En la Tabla 3.4 se resumen las condiciones físicas generales de las cuatro principales clases de suelos de la zona cafetera anotadas. Las mejores condiciones físicas se presentan en los suelos provenientes de cenizas volcánicas, los cuales poseen en general buena textura (francos) y estructura (granular), buena profundidad efectiva (40-60 cm), buen drenaje interno, buena capacidad de retención de humedad y mayor resistencia a la erosión en comparación con otros suelos de la zona cafetera, debido al predominio de minerales amorfos como la alófana. En los otros suelos pueden presentarse condiciones menos favorables desde el punto de vista de su profundidad, baja o excesiva capacidad de retención de agua y alta susceptibilidad a la erosión.

**Condición hídrica.** En toda la zona cafetera pueden existir condiciones físicas de suelo y de clima que conducen a niveles críticos de déficit o exceso de humedad. Los déficits hídricos son más frecuentes en aquellas regiones con inadecuada distribución de lluvias y texturas del suelo muy arenosas, suelos pedregosos, cascajosos y poco profundos.

El contenido de agua del suelo, cuando ha cesado todo movimiento descendente de ésta, se denomina capacidad de campo. Esta situación puede darse en

**Tabla 3.4.** Tendencias generales de las características físicas y químicas de los suelos cafeteros de Colombia (Grisales, 1977).

Suelo según material de origen	Textura	Estructura	Profundidad	Condición hídrica (Retención de Humedad)	Condición química	Aptitud Café
Cenizas volcánicas	Buena (Arenosos Francos Franco- limosos) Arcillosa (Malabar)	Buena Estable	Desde cm hasta varios metros	Buena capacidad de retención de humedad Buen drenaje interno	Baja fertilidad natural	Excelente (clima adecuado) (sol y sombra)
Metamórfico	Regular Inestable Pedregoso (esquistos)	Regular	Variable	Baja retención de humedad	Mediana fertilidad natural	Regular (sombrio necesario)
Igneo ácido	Arenosos	Mala	Baja-media	Mala Baja retención de humedad	Baja fertilidad	Baja
Igneo básico	Pesada Arcillosos	Mala	Baja-media	Regular-mala	Mediana fertilidad	Regular
Sedimentario	Arenosos o arcillosos Pedregosos	Mala	Limitada	Mala Mal drenaje interno	Mala (calcáreos)	Mala (sombrio necesario)

suelos bien drenados, dos o tres días después de una lluvia. Esta capacidad de campo está muy relacionada con la textura, el contenido de materia orgánica, el tipo de minerales presentes y la estructura del suelo. El porcentaje de agua retenida por el suelo bajo una presión de 1/3 de atmósfera (33 kPa) corresponde a la capacidad de campo. Aproximadamente la mitad del agua contenida en el suelo a capacidad de campo se halla tan fuertemente retenida que no puede ser utilizada por la planta. El punto de marchitamiento es el límite inferior de agua disponible para la planta y corresponde al agua retenida por el suelo frente a una presión de 15 atmósferas (1.500 kPa) (Suárez, 2001).

En la Tabla 3.5 se consigna un ejemplo de la condición hídrica en las diferentes clases de suelos de la zona cafetera. Se observa que el cafeto estaría más expuesto a deficiencias hídricas en los suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarios que en los derivados de cenizas volcánicas (Suárez *et al.*, 1984).

Si se considera como referente, 125 mm de deficiencia de agua como un valor que afecta la producción en café (*C. arabica*), esta condición se alcanzaría entre 30 a 40 días de deficiencia hídrica dependiendo de la altitud de la zona, 30 días para regiones bajas y 40 días para regiones altas. Según Jaramillo (2005), se podría hablar para el café de una tolerancia moderada a la deficiencia de agua.

La retención de humedad es alta en suelos derivados de cenizas volcánicas tanto a 33 como a 1.500 kPa, y

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** En las regiones con suelos de buenas propiedades físicas, adecuada retención de humedad y buena disponibilidad y distribución de las lluvias, puede cultivarse el café a plena exposición solar, en altas densidades de siembra, acompañado de un suministro adecuado de los nutrientes esenciales y aplicación de las prácticas culturales recomendadas. Bajo este sistema de cultivo pueden obtenerse entre 4 y 5 cosechas al final de las cuales, debe renovarse el cafetal.

debido a esta condición, las raíces absorbentes se desarrollan muy superficialmente; de acuerdo con esta característica en años muy lluviosos puede afectarse el crecimiento de la planta (Suárez, 1991).

**Aireación.** Se denomina aireación del suelo al intercambio de oxígeno atmosférico para ser consumido por la respiración de la raíz y los microorganismos, y a la liberación de CO<sub>2</sub>. Una aireación restringida causa una reducción del oxígeno y acumulación de CO<sub>2</sub> en el suelo, lo cual puede conducir a reducciones en la capacidad de absorción de agua y de la toma de los nutrientes y retardo o inhibición de los procesos de crecimiento de la raíz. De otra parte, las raíces sometidas a estrés de oxígeno sufren generalmente cambios morfológicos y fisiológicos marcados; son cortas, despobladas de raicillas, se concentran cerca de la superficie del suelo y en condiciones

**Tabla 3.5.** Características de la retención de humedad y densidad de algunos suelos de la zona cafetera colombiana (Suárez *et al.*, 1984).

Tipo suelo según su material de origen	Horizonte	Retención de humedad (%)			Densidad Mg/m <sup>3</sup>		Porosidad total (%)
		Capacidad campo (1/3 atm)	Punto de marchitez (15 atm)	Humedad disponible	Aparente	Real	
Cenizas volcánicas	Orgánico	68,8- 83,2	39,0- 56,0	27,0-38,1	0,54-0,73	2,06-2,30	68,3-75,4
	Inorgánico	95,8-180,0	51,0-112,0	24,1-97,0	0,37-0,79	2,05-2,44	66,1-82,0
Metamórficos ígneos y sedimentarios	Orgánico	17,6-36,5	10,7-24,7	6,9-11,8	0,9-1,4	2,4-2,6	45,0-59,2
	Inorgánico	17,5-31,7	10,7-20,9	6,9-11,8	1,4-1,6	2,6-2,7	39,0-51,3

extremas de estrés, mueren (Brady y Weil, 1999). La falta de oxígeno en el suelo está generalmente asociada con altas humedades o altas temperaturas. Puede causar desecación de la raíz. Una combinación de alta humedad del suelo y altas temperaturas del aire o del suelo causan el colapso de las raíces. La primera condición, aparentemente reduce la cantidad de oxígeno disponible para la raíz, mientras que la segunda aumenta los requerimientos de la planta. Al presentarse las dos condiciones, el resultado es una deficiencia severa de oxígeno para la planta, que causa su deterioro y muerte (Papendick y Elliot, 1983).

Para la mayoría de las plantas parece existir un nivel crítico de concentración de oxígeno en el suelo por debajo del cual se limita el crecimiento y la producción. Normalmente, el contenido de oxígeno en el suelo es un poco inferior al 20%, en las capas más superficiales en un suelo con una estructura estable y abundancia de macroporos. Este contenido puede reducirse a 5% o valores cercanos a cero en los horizontes más profundos de un suelo con drenaje pobre, si es consumido rápidamente por las raíces en crecimiento activo o por microbios. Cuando todos los poros del suelo se llenan de agua, los microorganismos extraen la mayor parte del oxígeno en el agua para su metabolismo. Una vez se ha agotado todo el oxígeno, se dice que el ambiente del suelo es anaeróbico (Brady y Weil, 1999).

**Densidad aparente.** La densidad aparente típica de un suelo mineral de textura media está alrededor de 1,25 Mg.m<sup>3</sup> (megagramos por metro cúbico), y varía dependiendo de la textura y las prácticas de uso y manejo del suelo. Cuando se incrementa el grado de compactación del suelo, se reduce el volumen de poros, aumenta su peso por unidad de volumen y en consecuencia aumenta la densidad aparente. La compresión del suelo afecta las condiciones de retención de humedad, limita el crecimiento de raíces y la absorción normal de nutrientes

y del agua, impide la actividad microbiana, reduce la infiltración e induce a cambios en la estructura y el comportamiento funcional del suelo (Brady y Weil, 1999). Las capas compactas se resisten a la penetración de las raíces debido a la mayor tenacidad del suelo, al reducido suministro de oxígeno y a la acumulación de dióxido de carbono. El desarrollo radical y la penetración del agua se ven limitados de manera significativa cuando la densidad aparente oscila entre 1,5 y 1,6 Mg.m<sup>3</sup>. El crecimiento de las raíces suele detenerse en los horizontes con densidades aparentes entre 1,7 y 1,9 Mg.m<sup>3</sup> (Brady y Weil, 1999). Según Salamanca *et al.* (2004), en las unidades Chinchiná, Fresno y Timbío, derivadas de cenizas volcánicas, la densidad aparente presenta valores entre 0,5 y 1,0 Mg.m<sup>3</sup>, con poca variación a lo largo del perfil, mientras que en la unidad Montenegro la densidad aparente es mayor y aumenta con la profundidad.

**Temperatura.** La temperatura del suelo es un factor tan importante como el agua para el crecimiento normal de la planta. El rango de temperatura en el cual crecen las plantas cultivadas puede estar entre 10 y 40°C. La temperatura óptima para el crecimiento cambia con la especie, la variedad, la edad de la planta, el estado de desarrollo y el tiempo de exposición (Brady y Weil, 1999).

La temperatura afecta directamente funciones y procesos de la planta como: la fotosíntesis, la respiración, la permeabilidad de las membranas, la absorción de agua y nutrientes, la transpiración, la actividad enzimática y la coagulación de las proteínas. Esta influencia se refleja en el crecimiento de la planta (Taiz y Zeiger, 1999).

Bajas temperaturas del suelo pueden afectar adversamente el crecimiento de la planta, por su efecto en la absorción del agua. Si la temperatura es alta y hay un exceso de transpiración, la planta puede sufrir

daños por deshidratación de los tejidos. La cantidad de agua en el suelo también está influenciada por la temperatura, ya que en períodos calurosos ocurre una rápida evaporación del agua superficial del suelo (Taiz y Zeiger, 1999).

Dentro de los pocos estudios sobre el régimen térmico de los suelos de la zona cafetera colombiana, se encuentra el realizado por Jaramillo y Gómez (1974), quienes estudiaron la variación de la temperatura en los primeros 50 cm de un suelo de origen volcánico. Observaron que en la superficie, la temperatura fluctúa entre 15 y 35°C y que al interior del perfil a los 50 cm, se alcanza un equilibrio cercano a los 24°C.

En otro estudio, Orozco y Jaramillo (1978), registraron en condiciones de invernadero que el déficit de humedad incrementó sensiblemente la temperatura del suelo a 2 cm de profundidad y también incrementó la temperatura de las hojas del café.

Franco (1958), estudió la influencia de la temperatura del suelo en el crecimiento de plantas jóvenes de café y encontró que los mejores resultados se alcanzaron con temperaturas de 26°C en el día y 20°C en la noche, y que variaciones de 5°C en cualquier dirección retardan el crecimiento. Las temperaturas entre 33 y 38°C redujeron la absorción de todos los elementos minerales.

**Condiciones químicas.** Entre los componentes químicos del suelo de importancia para el crecimiento del cafeto se encuentran la materia orgánica, el pH y los macro y micronutrientes.

La materia orgánica es considerada como un indicador de la productividad del suelo. Entre las funciones que desempeña se pueden señalar las siguientes: es fuente de nutrientes (nitrógeno, fósforo, azufre, boro y zinc, entre otros), incrementa la capacidad de intercambio de cationes, suministra energía para la actividad de los microorganismos, permite una adecuada agregación de las partículas del suelo mejorando así su estructura, capacidad de retención de agua y aireación. Debe anotarse que gran parte de estas funciones dependen de la descomposición de la materia orgánica (Suárez, 2001).

El pH del suelo es una característica de importancia como indicador de la condición de acidez o alcalinidad del suelo. En Colombia, el cafeto crece en suelos con valores de pH generalmente entre 5,0 y 6,0. La acidez del suelo afecta el desarrollo de la planta por su influencia en la disponibilidad de ciertos elementos esenciales o tóxicos para la planta. En muchos suelos se presenta un pH inferior a 5,0, el cual puede conducir a problemas de toxicidad de aluminio o de manganeso y deficiencias de calcio, magnesio, potasio, azufre, boro, cobre o zinc. En algunos suelos de origen sedimentario se presenta un pH muy alto (básico) debido principalmente a los

altos contenidos de calcio, y en estos casos es frecuente observar deficiencias de micronutrientes como manganeso, hierro, zinc, boro o cobre (Grisales, 1977; Aponte, 1984; Quevedo, 1986; Valencia, 1999; González y Sadeghian, 2003).

En general, los suelos de la zona cafetera son considerados de fertilidad natural media a baja (Tabla 3.6). Poseen contenidos medios a altos de materia orgánica, tendencia a la acidez, bajos contenidos de fósforo y responden bien a la fertilización nitrogenada, al potasio y al magnesio. Entre los micronutrientes, las deficiencias más frecuentemente observadas son las de hierro y boro, aunque su manifestación es temporal, la primera está asociada con períodos lluviosos y la segunda con períodos secos. La deficiencia de zinc ocurre esporádicamente o en lugares muy específicos.

**Elementos minerales esenciales para el crecimiento del cafeto.** Se han reconocido dieciséis elementos como esenciales para el crecimiento de las plantas. Tres de ellos, carbono, hidrógeno y oxígeno, son suministrados por el agua y el aire (dióxido de carbono). Los trece restantes se consideran nutrientes vegetales y pueden agruparse en seis macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre) que la planta requiere en grandes cantidades y siete micronutrientes (boro, cloro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc) que la planta toma en muy pequeñas cantidades. Cuando alguno de estos elementos se encuentra en la planta en cantidades inferiores a los niveles mínimos requeridos para el crecimiento normal, la planta exhibe varios síntomas externos e internos, los cuales aparecen en cualquiera de sus órganos incluyendo hojas, tallos, raíces, flores, frutos y semillas (Havlin *et al.*, 1999).

Los diferentes tipos de síntomas que se presentan cuando ocurre la deficiencia de un elemento dependen de las funciones de ese elemento particular en la planta, las cuales son inhibidas o interferidas cuando este elemento es limitativo.

En la Tabla 3.6 se muestran los rangos de los principales componentes minerales del suelo y los contenidos minerales foliares considerados más adecuados para el normal crecimiento y producción del cafeto en la zona cafetera colombiana (Valencia *et al.*, 1989; Valencia, 1986; Valencia y Arcila, 1977). Cuando la planta se encuentra fuera de estas condiciones es muy probable que presente una sintomatología relacionada con la deficiencia o el exceso de algún elemento.

Solamente una pequeña parte de cada nutriente presente en el suelo se encuentra disponible para la planta. El resto se halla tan firmemente ligado a la fracción mineral y a la materia orgánica, que es inaccesible mientras no sea afectado por los procesos de descomposición. Estos ocurren lentamente, durante períodos largos y los nutrientes son liberados de modo gradual.

**Tabla 3.6.** Rangos de contenidos minerales del suelo y foliares más adecuados para el desarrollo del cafeto en Colombia (Valencia *et al.*, 1989; Valencia y Arcila,1977).

Rango adecuado					
Contenido del suelo	Límite inferior	Límite superior	Contenido Foliar	Límite inferior	Límite superior
Materia orgánica (%)	11,4	12,6	Nitrógeno (%)	2,3	2,8
Fósforo (mg.kg <sup>-1</sup> )	6	14	Fósforo (%)	0,1	0,18
Potasio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,3	0,4	Potasio (%)	1,5	2
Calcio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	1,8	2,4	Calcio (%)	0,5	2
Magnesio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0,6	0,8	Magnesio (%)	0,3	0,4
Aluminio (cmol <sub>(+)</sub> .kg <sup>-1</sup> )	0	60			
Saturación aluminio (%)	0	60			
pH	5	5,5			
Boro (mg.kg <sup>-1</sup> )	0,2		Boro (mg.kg <sup>-1</sup> )	40	60
Zinc (mg.kg <sup>-1</sup> )	1		Zinc (mg.kg <sup>-1</sup> )	9	
Manganeso (mg.kg <sup>-1</sup> )	50		Manganeso (mg.kg <sup>-1</sup> )	150	220
Hierro (mg.kg <sup>-1</sup> )	100		Hierro (mg.kg <sup>-1</sup> )	90	140
Cobre (mg.kg <sup>-1</sup> )	1		Cobre (mg.kg <sup>-1</sup> )	10	

Los suelos también pueden contener cantidades excesivas de ciertos elementos esenciales o no, los cuales al encontrarse en concentraciones altas pueden ser perjudiciales para la planta. De los elementos esenciales, aquellos que la planta requiere en mayores cantidades como el nitrógeno y el potasio, son generalmente menos tóxicos cuando se encuentran en exceso, que aquellos elementos que se requieren en cantidades trazas como el manganeso, el zinc y el boro. Dentro de esta última categoría, algunos elementos como el manganeso y el magnesio tienen un rango de seguridad más amplio que los otros. Además, los elementos no sólo difieren en su rango de toxicidad sino que las plantas también difieren en su grado de susceptibilidad a la toxicidad, de acuerdo al

nivel del elemento. La concentración a la cual un elemento no esencial es tóxico también varía entre los elementos.

El daño resultante por el exceso de un elemento puede variar desde ligero hasta muy severo y generalmente, es el resultado del daño directo a la célula por el elemento o puede deberse a una interferencia de la absorción o la función de otro elemento, lo cual conduce a la manifestación de síntomas de deficiencia del elemento con el cual interfiere. Por ejemplo, un exceso de potasio induce deficiencias de magnesio y calcio, mientras que una toxicidad por cobre, manganeso o zinc produce un daño directo y a la vez, puede inducir una deficiencia de hierro en la planta (Havlin *et al.*,1999).

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** Cuando la planta de café está sometida a una alta deficiencia hídrica (por ejemplo, 30 - 40 días continuos sin lluvia), detiene su crecimiento, el follaje se torna de color verde pálido o ligeramente amarillo, el tamaño de las hojas es menor que lo normal, la planta pierde follaje y si la sequía se prolonga, se marchita y muere. Cuando la sequía es interrumpida por la lluvia, la planta reacciona mostrando una senescencia acelerada y la caída de hojas y frutos.

Para que el desarrollo del fruto del cafeto sea normal se requiere disponibilidad de agua en el suelo durante los ocho meses comprendidos entre la floración y la cosecha, con un período crítico entre las semanas 8 y 16, en el cual se define el tamaño del fruto.

En los suelos de la zona cafetera y de las fincas, también ocurren condiciones físicas desfavorables como alto contenido de arcillas y alta retención de humedad, que causan mal drenaje o encharcamiento. El exceso de humedad por drenaje pobre o encharcamiento puede causar rápidamente problemas más serios en la planta que la falta de humedad. El drenaje pobre deteriora y pudre la raíz, y produce plantas de aspecto poco vigoroso, que se marchitan con frecuencia y de follaje verde pálido o verde amarillento. En árboles perennes, los daños se observan lentamente y sólo después de que la zona de raíces ha permanecido inundada por varios días.

Como resultado de la excesiva humedad del suelo, las raíces absorbentes se deterioran debido a la escasez de oxígeno, ocurriendo estrés, asfixia y muerte de muchas células de la raíz. Las condiciones húmedas favorecen el crecimiento de organismos anaeróbicos, que durante sus procesos vitales forman sustancias como nitritos, tóxicas para la planta. De otra parte, las células radicales dañadas directamente por la falta de oxígeno, pierden su permeabilidad selectiva y permiten así la entrada o acumulación en su interior de sustancias tóxicas.

## Factores genéticos (especies y variedades) y su incidencia en la productividad del cafetal

### Especies y variedades cultivadas en Colombia

Los sistemas de producción de café en Colombia se han desarrollado solamente con variedades de la especie *Coffea arabica* L. Desde los comienzos de la caficultura colombiana con sentido comercial, hacia 1810 y hasta finales de los años 1950, predominó el cultivo de variedades de porte alto como la variedad Típica, en cultivos extensivos, con bajas densidades de siembra y con sombra (Castillo, 1968, 1990). Posteriormente, entre los años 1970 y 1990 el cultivo evolucionó hacia sistemas intensivos a plena exposición solar, con variedades de porte bajo (Mestre y Salazar, 1990).

La década de los años 90, se caracterizó por un incremento del cultivo de variedades de porte bajo con resistencia a la roya del cafeto, como la variedad Colombia (Castillo y Moreno, 1988).

Recientemente se ha liberado la variedad Tabi de porte alto y también resistente a la roya del cafeto (Moreno, 2002). A partir del año 2005 se liberaron la Variedad Castillo® y las Variedades Castillo® regionales, para su cultivo en regiones específicas (Alvarado *et al.*, 2005).

**Variedad Típica.** Variedad de porte alto. Representa el tipo de especie *C. arabica* descrito por Linneo. Fue la primera variedad que se cultivó extensivamente en América, con una amplia adaptación a diferentes tipos de suelos y climas. Fue la única variedad cultivada extensamente en Colombia hasta 1960 (Castillo, 1960).

En Cenicafé, se inició un proceso de selección entre 1941 y 1960, en el cual se obtuvieron una serie de progenies muy vigorosas y de excelente calidad, tanto en apariencia del grano como en la calidad de la bebida. Por más de 20 años, se recomendó a los agricultores esta semilla seleccionada. Sin embargo, el estudio de las progenies de árboles seleccionados y la comparación de la variedad Típica con otros cultivares, demostró su marcada uniformidad genética y su inferior capacidad productiva cuando se empleaba en cultivos intensivos. Así, pudo comprobarse que la enorme variación entre árboles de un mismo cafetal, se debía a factores ambientales principalmente a variaciones accidentales en el desarrollo de las ramas productivas y a la influencia del sombrío en la distribución de la luz solar y no ofrecía ninguna posibilidad para obtener selecciones altamente productivas. De igual manera, se concluyó

que las grandes variaciones observadas entre plantas, en lo referente a distribución anual de la producción, tampoco estaban gobernadas por la constitución genética de los árboles y no se transmitían a su descendencia (Castillo y Quiceno, 1968; Castillo, 1990).

**Variedad Borbón (rojo y amarillo).** Fue descubierta en 1715 en la Isla de Borbón (hoy Reunión) de donde viene su nombre. En Brasil se cultiva el tipo con grano amarillo y en Colombia el rojo. En Colombia se sembró desde 1928, pero no fue adoptada ampliamente por los caficultores, debido a que al cultivarse bajo sombra intensiva no se le dio un manejo adecuado para expresar su potencial. En pruebas regionales realizadas en la década del 50, se encontró que la variedad Borbón era más productiva que la variedad Típica, con un rendimiento en general entre 20 y 30% mayor, y en algunos ambientes esta diferencia fue hasta del 50%. En Colombia, se obtuvieron dos selecciones de especial interés: Borbón RM, resistente a la llaga macana y la selección Amarillo Chinchiná, con características intermedias entre Típica y Borbón, y semillas de mayor tamaño que Típica (Triana, 1955; Castillo, 1960; Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1979).

**Variedad Caturra.** Es un mutante derivado de la variedad Borbón que se descubrió en Brasil entre 1915 y 1918. Se caracteriza por tener entrenudos muy cortos tanto en el tallo como en las ramas, por lo cual alcanza un desarrollo menor que el de las variedades Borbón y Típica.

Como consecuencia de la introducción al país, en 1952, de variedades de porte bajo como la variedad Caturra, y soportados en sus altas producciones y tamaño de la planta reducido, en las décadas del 60 y 70 ocurrió un importante proceso de transformación tecnológico de la caficultura colombiana con la adopción del cultivo intensivo y a plena exposición solar, con base en la siembra de esta variedad (Castillo, 1990, 1967).

Con la aparición de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) en 1983, la cual afecta tanto a la variedad Caturra como a las variedades tradicionales como Típica y Borbón, y gracias al desarrollo de la variedad Colombia, se continuó con el cultivo intensivo pero ahora con variedades resistentes a esta enfermedad.

**Variedad Colombia.** Cultivar compuesto de numerosas progenies de porte bajo seleccionadas en la transferencia de resistencia del Híbrido de Timor a la variedad Caturra. Esta mezcla reúne gran diversidad genética con relación a la resistencia a la roya, y al mismo tiempo, alcanza alta productividad y excelente calidad del producto (Castillo y Moreno, 1988).

**Variedad Castillo®.** Las investigaciones de la última década han permitido la selección de nuevas progenies de porte bajo con resistencia a la roya y con mejores

características de tamaño de grano y productividad. La mezcla de estas progenies es lo que hoy se denomina como Variedad Castillo®, la cual se liberó en el año 2005 (Alvarado *et al.*, 2005).

En investigaciones recientes se encontró un mejor comportamiento de la producción de algunas de estas progenies componentes de la Variedad Castillo®, en ambientes contrastantes, por lo que se conformaron mezclas específicas para algunas regiones (Alvarado, 2005), las cuales se denominaron:

**Variedad Castillo® El Rosario:** Para divulgación en el departamento de Antioquia y en ciertas zonas de los departamentos de Caldas y Risaralda.

**Variedad Castillo® Naranjal:** Para divulgación en ciertas zonas de los departamentos de Risaralda, Valle del Cauca, Quindío y Caldas.

**Variedad Castillo® Paraguaicito:** Para divulgación en los departamentos del Quindío y Valle del Cauca.

**Variedad Castillo® La Trinidad:** Para divulgación en el departamento del Tolima.

**Variedad Castillo® Pueblo Bello:** Para divulgación en los departamentos de Cesar, La Guajira, Magdalena y Norte de Santander.

**Variedad Castillo® Santa Bárbara:** Para divulgación en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.

**Variedad Castillo® El Tambo:** Para divulgación en los departamentos de Cauca y Nariño.

**Variedad Tabi.** Debido a que en el país todavía se tiene cerca del 30% del área en la que se cultiva la variedad Típica, desde el año 1970 Cenicafé inició un programa para desarrollar variedades de porte alto con resistencia a la roya. Como resultado de este programa se produjo la variedad Tabi, la cual se liberó en el año 2002.

La variedad Tabi está compuesta por la mezcla de varias progenies provenientes de los cruzamientos entre el Híbrido de Timor y las variedades Típica y Borbón, con muy buenas características de producción y calidad de grano (Moreno, 2002).

**Variedad Maragogipe.** Se descubrió en el municipio de Maragogipe, estado de Bahía, Brasil, en 1870. Su altura lo mismo que sus ramas y hojas son mayores que en las variedades Típica y Borbón. En Colombia se tienen unas pocas hectáreas cultivadas en Antioquia desde 1930 (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1979).

En la Tabla 3.7 se registra un resumen de las principales características de las variedades de café cultivadas en Colombia.

En general, estas variedades han mostrado un alto grado de adaptación y potencialidad y estabilidad productiva en las condiciones prevalecientes en la zona cafetera colombiana, y la productividad que se obtenga dependerá fundamentalmente del sistema de cultivo aplicado (Figura 3.4) (Gómez *et al.*, 1990).

**Tabla 3.7.** Características morfológicas, agronómicas y del grano de las variedades de café cultivadas en Colombia (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2004; Alvarado *et al.*, 2005).

Característica	Típica	Borbón	Maragogipe	Tabi	Caturra	Colombia	Castillo®	Castillo® Regional
Resistencia a roya	No	No	No	Si	No	Si	Si	Si
Porte	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Color brote apical	Bronce	Verde	Bronce	Bronce y verde	Verde	Bronce y verde	Bronce y verde	Bronce y verde
Altura 24 meses (cm)	226	237	Mayor que Típica y Borbón	243	137*	165*	154	153
Diámetro copa (cm) 24 meses-30* meses	180	177	Mayor que Típica y Borbón	200	112*	133*	172	172
Densidad siembra sol	2.500	2.500	2.500	2.500	Hasta 10,000	Hasta 10,000	Hasta 10,000	Hasta 10,000
Densidad siembra Sombra (25-50%)	1.500	1.500	1.500	1.500	Hasta 4.000	Hasta 4.000	Hasta 4.000	Hasta 4.000
Producción kg cps/planta sol	0,9	1,2	0,7	1,0	0,5	0,5	0,5	0,6-0,7
Producción kg cps/planta Sombra (25-50%)	0,6	0,8	0,5	0,7	0,35	0,35	0,35	0,4-0,5
% grano supremo	70	46	90-100	85	62,7	52,8	83,0	85
% vanos	4	4	4	3,7	5	5	4,4	5
% caracol	8	7,6	7,0	8,0	8,7	11,2	7,0	7,0

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** Las variedades empleadas no determinan la productividad per se, por lo cual es necesario considerar los diversos elementos fisiológicos que intervienen en la producción de la planta y el cultivo. Así mismo, deben evaluarse los factores externos como el clima y el suelo, y la interacción de estos con el material genético empleado en cada una de las zonas cafeteras de Colombia.

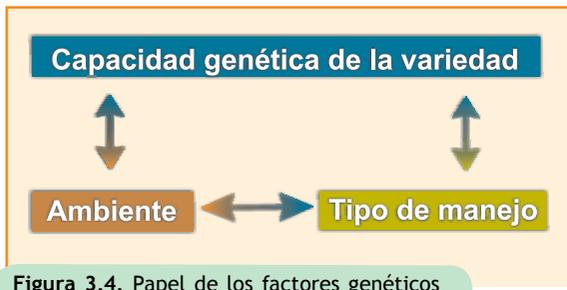


Figura 3.4. Papel de los factores genéticos en la productividad de los cultivos.

## Producción potencial de *Coffea arabica* en Colombia

### Producción de materia seca

De acuerdo con la disponibilidad energética de la zona cafetera colombiana de 170-220  $\text{wm}^2$  y si se considera que entre el 90 y el 95% de la materia seca consta de compuestos carbónicos derivados de la fotosíntesis, se ha calculado un potencial de producción de materia seca total de 120 a 190 toneladas por hectárea y por año, según el método de Loomis y Williams (1963). Sin embargo, en la práctica, en la zona cafetera central con *C. arabica* L. variedad Caturra, de 5 años de edad y bajo condiciones de máxima interceptación lumínica (10.000 plantas/ha al sol) se han obtenido producciones de materia seca de 15 a 30 toneladas por hectárea y por año (Tabla 3.8) (Arcila, 1990). Mediciones más recientes en variedad Colombia, en tres localidades con diferente disponibilidad hídrica, permitieron observar valores de 7 a 8 kg de materia seca

por planta, que para densidades de 5.000 plantas por hectárea representa un potencial de 35 a 40 t/ha (Riaño *et al.*, 2004). Estos valores son equivalentes entre un 8 y un 30% del potencial calculado. Lo anterior estaría indicando una alta ineficiencia de la planta de café en la utilización de la energía disponible, por factores intrínsecos de la planta o por influencia del ambiente.

### Determinantes de la producción de materia seca

La producción de biomasa y materia seca son el resultado de: 1) la disponibilidad y capacidad de uso de la radiación solar por el cafeto; 2) la superficie disponible para la captación de luz para los procesos de fotosíntesis y biosíntesis; 3) la tasa y eficiencia fotosintética; y 4) el balance resultante en la distribución de asimilados (Cannell, 1972, 1985).

#### 1. Uso de la radiación solar por el cafeto

**Balance de radiación.** El flujo de radiación para una plantación de *C. arabica* L. variedad Caturra sembrada a una distancia de un metro entre surcos y uno entre plantas (Figura 3.5), muestra que de la radiación global incidente sobre la planta, aproximadamente el 15% es reflejada, el 75% es absorbida por el follaje y un 10% se absorbe por el suelo. De la radiación que llega al follaje aproximadamente el 90-95% es absorbida por la planta y cerca del 50% es radiación fotosintéticamente activa (RFA). De la radiación absorbida por el follaje, las hojas más externas interceptan cerca del 90%, quedando aproximadamente 5% para el resto (Jaramillo y Santos, 1980). Las tasas de disminución de energía o coeficientes de extinción, dentro del follaje, varían a razón de 0,4 - 0,5 por cada unidad de índice de área foliar que se acumule (Castillo *et al.*, 1996). En otros cultivos perennes tropicales la eficiencia de conversión de la RFA en materia seca es de 1,6 a 3,0% .

**Balance de energía.** El balance de energía se refiere al uso de la energía en procesos como calentamiento del aire y del suelo, evapotranspiración y fotosíntesis. En una

Tabla 3.8. Producción de materia seca de dos variedades de café en Chinchiná, Colombia 1985, sembradas a 1 x 1m entre plantas y entre surcos (Arcila,1990).

VARIEDAD	Materia seca (g/planta) según edad del cafeto (años)		
	3	4	5
Caturra	1.514,6	2.372,1	2.952,4
Colombia	1.475,3	2.424,4	31.111,6

plantación de *C. arabica* L. variedad Caturra, sembrada a 1 x 1 m, a plena exposición solar, de la radiación neta que llega al follaje, un 60% aproximadamente es usada en el proceso de evapotranspiración, un 36% se consume en calentamiento del aire y un 2% se utiliza en el calentamiento del suelo (Figura 3.6) (Jaramillo y Escobar, 1983).

## 2. Superficie disponible para la captación de luz, la fotosíntesis y la biosíntesis

**Desarrollo foliar.** El hábito perenne del cafeto y las condiciones ambientales de disponibilidad de agua y energía de nuestra zona cafetera permiten un continuo desarrollo del follaje. La cantidad de follaje es además,

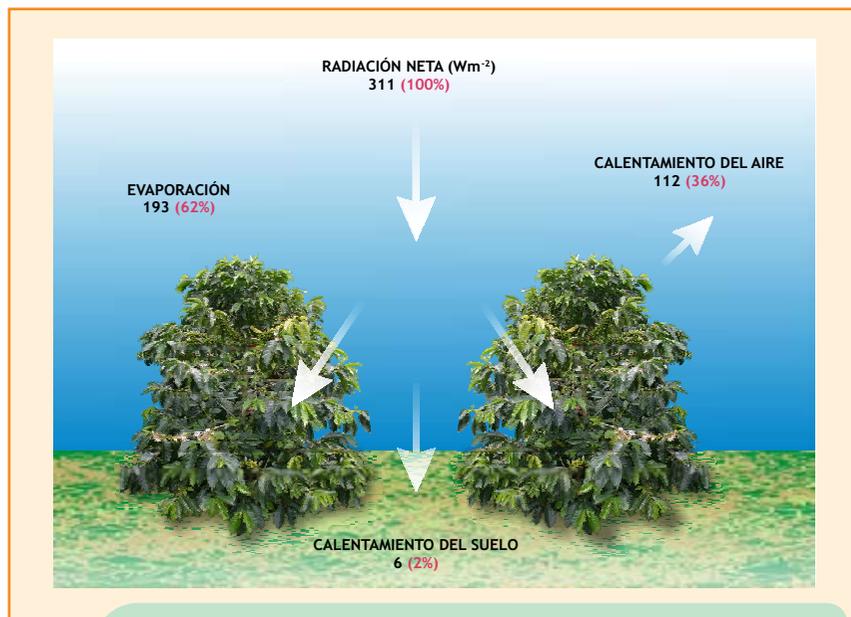


Figura 3.5. Balance de radiación solar en *C. arabica* L. variedad Caturra, a 1m x 1m (Jaramillo y Santos, 1980).

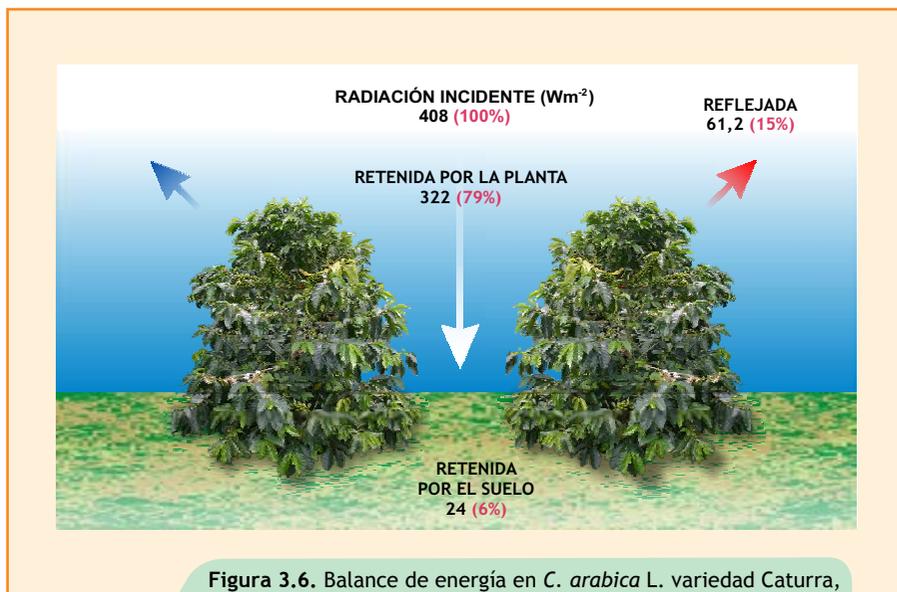


Figura 3.6. Balance de energía en *C. arabica* L. variedad Caturra, a 1m x 1m (Jaramillo y Escobar, 1983).

altamente influenciada por la variedad, la distancia de siembra, la fertilización y la edad del cultivo (Gómez, 1977; Jaramillo y Valencia, 1980; Jaramillo y Guzmán, 1984).

El desarrollo foliar de las variedades Caturra y Colombia, en varias distancias de siembra y para varios años, muestra que a distancias de siembra más amplias, por ejemplo 2.500 plantas.ha<sup>-1</sup>, el desarrollo foliar es mayor alcanzando valores cercanos a los 20 m<sup>2</sup> de superficie foliar. A distancias de siembra más cortas, por ejemplo 10.000 plantas.ha<sup>-1</sup>, los máximos valores de área foliar están alrededor de 10 m<sup>2</sup> en plantas de 4 años de edad (Figura 3.7) (Valencia, 1973; Arcila y Chávez, 1995).

En Colombia el mayor desarrollo foliar ocurre inmediatamente después de las floraciones y antes del comienzo de la fase de crecimiento acelerado de los frutos (Arcila,1983).

Con relación a la luz, Castillo (1966), observó en plantas de almácigo, que el área foliar se reduce en la medida en que se aumenta el sombrío (a partir del 40%). Al aumentar la intensidad de luz se aumenta el número de hojas. La luz influye además sobre las características morfológicas de la hoja, por ejemplo, la longitud disminuye al aumentar la intensidad y las hojas son más delgadas. Con respecto al balance de materia seca de la planta bajo condiciones de alta densidad, las hojas

representan entre el 19 y el 30% de la materia seca total (Arcila, 1990). Cannell (1985), en Kenya, obtuvo valores de 40-45%, es decir, el cafeto presenta una fronda relativamente grande y por consiguiente, un buen potencial de captación de radiación solar.

**Índice de área foliar.** La producción de materia seca es directamente proporcional a la captación de energía radiante y por tal motivo, para la obtención de cosechas abundantes y de buena calidad es esencial un alto grado de cobertura efectiva del terreno, el cual se determina con el índice de área foliar (IAF) (Watson,1947).

En *C. arabica*, Valencia (1973), para variedad Caturra y Arcila y Chávez (1995), para la variedad Colombia, encontraron valores máximos de índice de área foliar (IAF) de 8 y 7, respectivamente (Figuras 3.8A y 3.8B). En plantas de la variedad Caturra con un IAF de 8, se obtienen las máximas producciones. Este valor se consigue a los 3 años con una densidad de 10.000 plantas/ha y a los 4 años con 5.000 plantas/ha. Para mantener el índice de área foliar óptimo será necesario un manejo cuidadoso de la distancia de siembra, las podas, la fertilización, el control de los agentes que atacan el cultivo y la duración del mismo. Los estudios realizados en Colombia indican que para obtener estos índices en variedades de porte bajo y al sol se requieren densidades de siembra entre 5.000 y 10.000 tallos por hectárea (Figura 3.7) (Castillo, 1996).

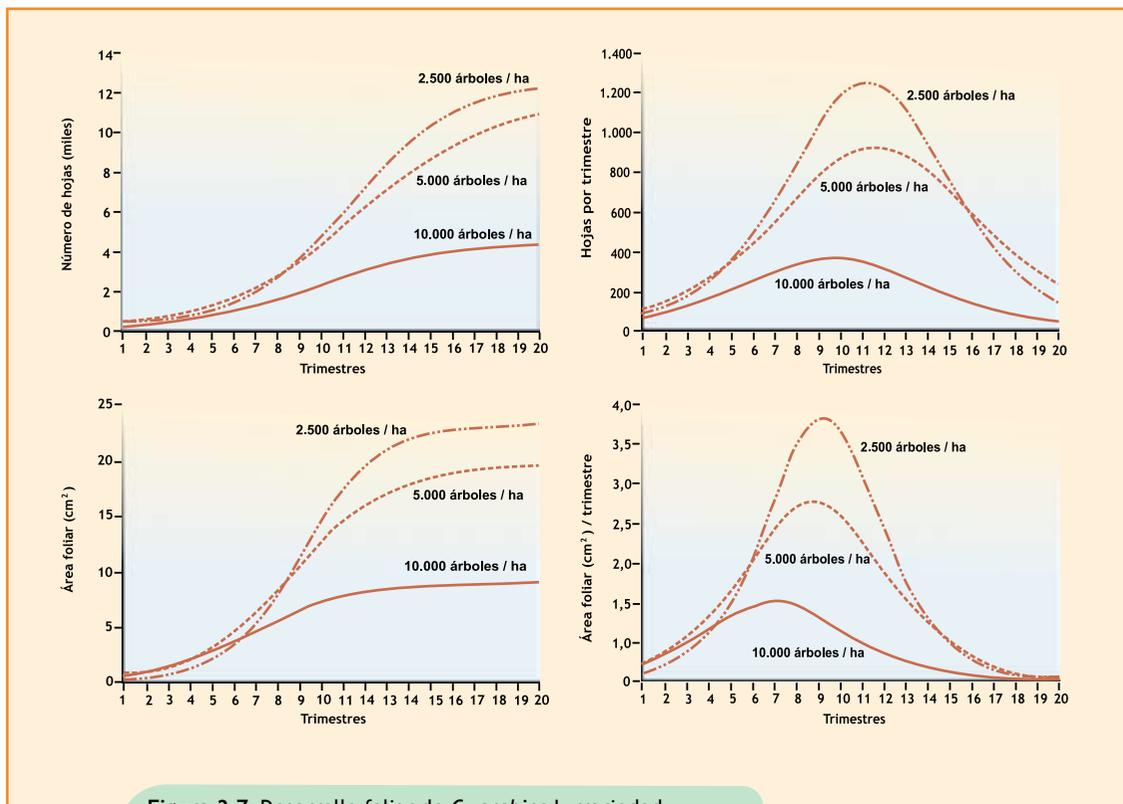


Figura 3.7. Desarrollo foliar de *C. arabica* L. variedad Colombia, en tres densidades de siembra (Arcila y Chávez,1995).

Para una máxima captación de luz sería deseable una distribución uniforme del follaje sobre el terreno, lo cual se logra empleando igual distancia entre plantas y entre surcos (Figura 3.8) (Castillo,1996). En investigaciones de Cenicafé, Uribe y Mestre (1988), no encontraron diferencias en producción entre la distribución de las plantas en forma rectangular o en cuadro y para varias densidades de siembra. La distribución uniforme en el terreno es favorable para la captación de luz y la regulación de la temperatura dentro del cultivo, y también para el control de arvenses en forma temprana; sin embargo, puede ser desfavorable para la evaporación del agua en zonas muy húmedas y para la movilización dentro del cultivo cuando se efectúan algunas labores.

**Arquitectura de la planta.** A pesar de no existir un estudio detallado de la arquitectura de las plantas

de *C. arabica* y su relación con la producción, pueden considerarse con referencia a la disposición de las ramas, básicamente dos tipos de arquitectura, que podrían ser de interés desde el punto de vista de producción de materia seca: 1) Tipo planófila, con ramificación predominantemente plagiotrópica, ejemplo variedad Caturra (Figura 3.9A); y 2) Tipo erectófila con ramificación predominantemente ortotrópica, ejemplo la variedad Erecta (Figura 3.9B) (Arcila, 1990; Orozco, 1977).

En el tipo planófila las ramas se insertan en un ángulo aproximado de 80-90° con relación al tallo y la mayoría de las hojas se insertan en el rango de ángulos de 0-30°. En el tipo erectófila las ramas se insertan en un ángulo de 30-40° y las hojas están dispuestas horizontalmente. Sin embargo, con el peso de los frutos y la edad de la planta, las ramas se doblan y pueden presentarse dos

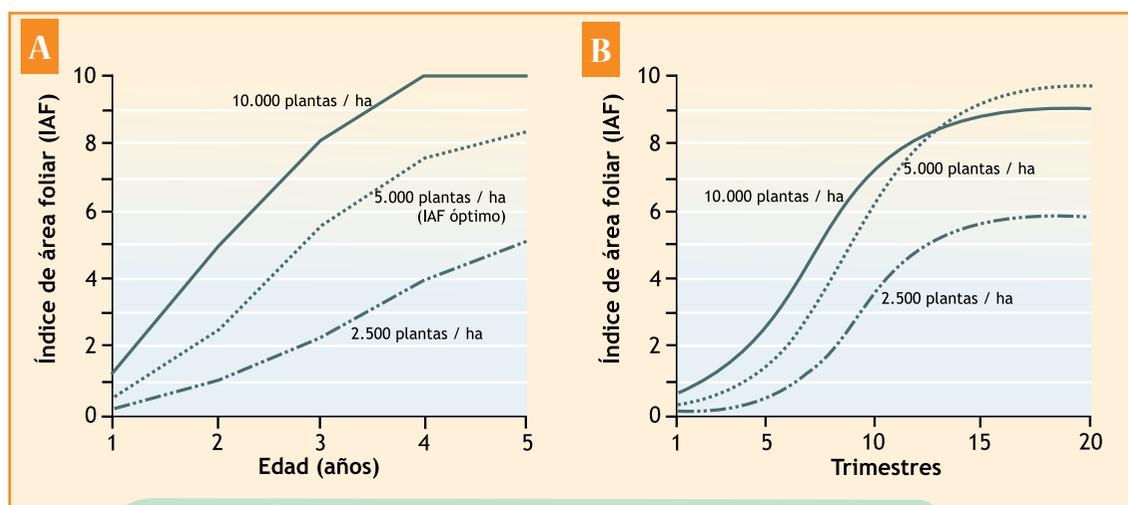


Figura 3.8. Índice de área foliar (IAF) en *C. arabica* L. A). Variedad Caturra (Valencia, 1973). B). Variedad Colombia (Arcila y Chávez, 1995) .

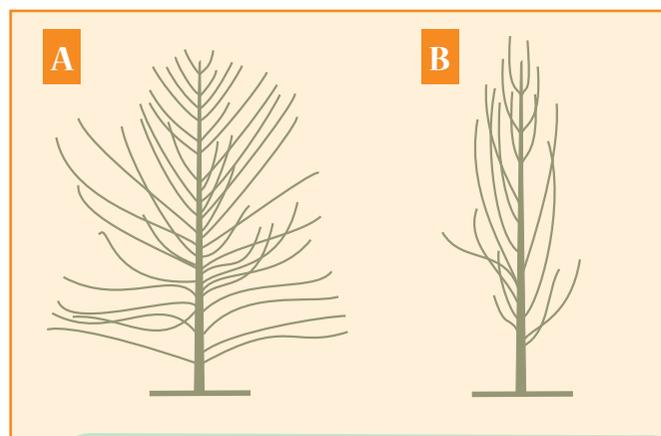


Figura 3.9. Arquitectura de plantas de *C. arabica* L. A). Tipo planófila (variedad Caturra); B). Tipo erectófila (variedad erecta) (4, 40, 42).

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** Los hábitos de crecimiento y la producción del cafeto en Colombia, así como su arquitectura, inducen una conformación especial de la planta que afecta su comportamiento, por lo cual podría hablarse de “regiones fisiológicas” en la planta, así: zonas de crecimiento vegetativo activo, zonas de crecimiento reproductivo tanto de flores como de frutos y zonas de senescencia (Figura 3.11). Entre estas zonas, las condiciones de luz y temperatura son diferentes y éstas deben considerarse cuando se tienen algunos problemas de plagas y enfermedades. Varios estudios han demostrado que las hojas viejas del cafeto tienen una menor actividad fotosintética que las hojas jóvenes. Esta situación es más crítica en la parte baja de la planta en donde las ramas tienden a desaparecer con el tiempo, debido principalmente a condiciones de baja iluminación, más acentuadas en cultivos densos. Las anteriores consideraciones deben tenerse en cuenta como factores que afectan la producción de materia seca.

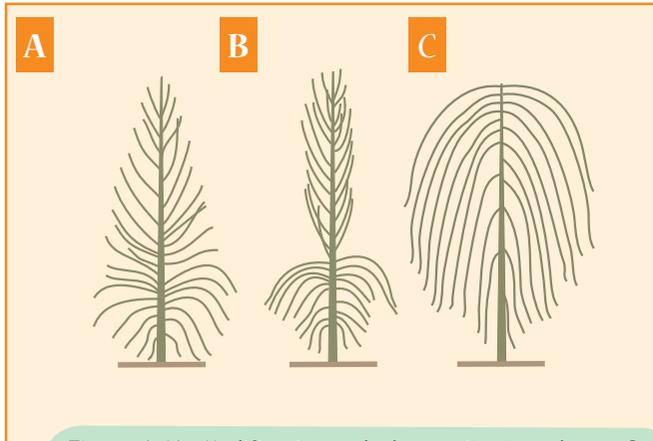


Figura 3.10. Modificaciones de la arquitectura de en *C. arabica* L. A y B) : Modificaciones con la edad; C) Modificación por poda de la planta.

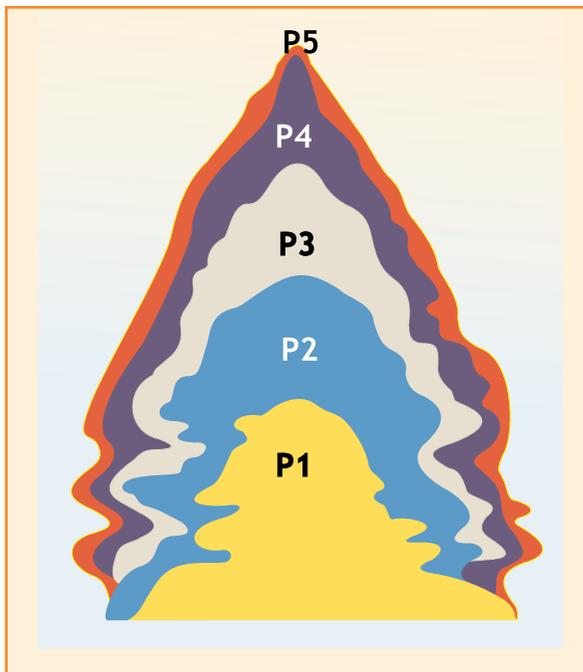


Figura 3.11. Regiones fisiológicas de una planta de café de 3 años de edad. P1=Zona de senescencia; P2= Zona de crecimiento activo de frutos; P3= Zona de crecimiento de flores; P4= Zona de crecimiento activo de hojas; P5= Zona meristemática (Arcila,1990).

tipos de arquitectura: la original, en la parte superior de la planta y la modificada predominantemente plagiotrópica en la parte inferior de la planta. Mediante prácticas de manejo como la poda, por ejemplo el descope, también cambia la arquitectura (Figura 3.10). Las plantas de arquitectura planófila son aparentemente más productivas que las de tipo erectófila. Dados los altos índices de área foliar (IAF) del café en densidades altas, el ángulo de inserción de las ramas, la forma y el tamaño de la hoja, podrían modificarse para optimizar la captación de luz (Castillo, 1996).

### 3. Tasa y eficiencia fotosintética y distribución de asimilados

**Tasa fotosintética.** Según Cannell (1985), hay cuatro características de la tasa fotosintética del café que reflejan su condición de planta adaptada a la sombra:

1) En las hojas a plena exposición solar, las tasas máximas de fijación de  $\text{CO}_2$  son bajas alcanzando valores de  $7 \mu\text{moles.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ , mientras que las hojas a la sombra pueden alcanzar valores de fijación de  $\text{CO}_2$  hasta de  $14 \mu\text{moles.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

2) Las hojas a plena exposición solar se saturan con un máximo de  $250 - 300 \text{ Wm}^{-2}$ , en comparación con las hojas a la sombra que se saturan con  $150 \text{ Wm}^{-2}$ . Se considera que en el trópico hay disponibles a medio día, en un día soleado, alrededor de  $500 \text{ Wm}^{-2}$ .

3) La tasa de fotosíntesis neta disminuye en forma acentuada al aumentar la temperatura de la hoja por encima de  $25^\circ\text{C}$ , debido probablemente al cierre de estomas por deshidratación de la hoja. Así, en un día soleado, la tasa de fotosíntesis neta de las hojas más externas de un café a plena exposición solar será baja, porque la temperatura de la hoja puede alcanzar valores de  $35-40^\circ\text{C}$ .

4) La exposición continua a alta radiación solar puede causar daños al aparato fotosintético, aún en hojas adaptadas a la plena exposición solar.

**Eficiencia fotosintética.** De acuerdo a la radiación solar incidente en la zona cafetera colombiana, se tendría una eficiencia fotosintética teórica de 4,6% (Arcila, 1990). Según Friend (1984), las hojas de café al sol tienen una eficiencia cuántica de fotosíntesis de 0,034 y las hojas a la sombra una eficiencia de 0,055. Las tasas de respiración como evolución de  $\text{CO}_2$  se estimaron en  $0,1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  para plantas con 5% de luz y en  $0,3$  para plantas con 100% de luz. En Brasil, Sondhal (1976), estimó la fotorespiración en  $2 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , como un 37% de la fotosíntesis neta y 2,8 veces la respiración oscura ( $0,7 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ).

Con base en las consideraciones anteriores no es contradictorio que en el trópico se obtengan mayores producciones en cafetos a plena exposición solar que a la sombra. En primer lugar, debido a la nubosidad, la radiación incidente disminuye hasta en un 50% en las regiones en que se cultiva café en Colombia. En segundo lugar, muy pocas hojas del árbol adulto están realmente a plena exposición solar, ya que el auto y mutuo sombrío proporcionan bajas intensidades lumínicas y bajas temperaturas foliares, que permiten mayor eficiencia de la fotosíntesis y en el crecimiento. Estas consideraciones también permiten explicar el porqué el

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** El llenado de frutos es un período durante el cual ocurre la mayor competencia de asimilados, lo cual a su vez se refleja en menores tasas de crecimiento de la planta. Estos frutos pueden atraer asimilados de todas las hojas de una rama, excepto las más tiernas, así como de las hojas de las ramas laterales. Cuando la fructificación es abundante y la disponibilidad de productos fotosintéticos insuficiente, se reducen el crecimiento vegetativo y el suministro de asimilados a la raíz, y como consecuencia pueden morir los brotes de las ramas o puede producirse el “paloteo”. Además, se acentúa el fenómeno de fructificación bienal.

En Colombia, los estudios sobre el efecto de la defoliación en plantas en producción indican que durante el período comprendido desde los dos meses después de las floraciones hasta un mes antes de iniciar la cosecha, por ejemplo abril - agosto en Chinchiná, es importante la presencia de una buena cantidad de follaje con alta capacidad fotosintética para satisfacer las demandas de asimilados de la cosecha en formación. En Francia, se estudió el efecto de la defoliación artificial sobre la actividad fotosintética de plantas en estado vegetativo. La pérdida de hojas viejas no tuvo un efecto marcado en la fotosíntesis mientras que la remoción de hojas jóvenes, especialmente las periféricas, tuvo un efecto severo en la fotosíntesis.

café tolera altas densidades de siembra. Sin embargo, puede haber limitaciones de la tasa fotosintética por temperatura, en zonas fuera del rango óptimo. En las hojas más expuestas, las temperaturas pueden alcanzar valores hasta de 38,5°C (Jaramillo y Gómez, 1989).

**Repartición de asimilados.** En la planta de café el crecimiento del follaje y las ramas ocurre simultáneamente con el desarrollo de la cosecha por tanto, ocurre competencia por recursos. Así el suministro no solo dependerá de la actividad de la fuente sino también de la manera como se distribuyan entre las estructuras (los vertederos) que compitan por ellos.

En Colombia, en las zonas donde la cosecha es más abundante en el segundo semestre (septiembre - diciembre), las mayores floraciones ocurren de enero a marzo, seguidas por un máximo crecimiento foliar en abril y por el llenado de los frutos que comienza en abril y continúa hasta julio. Por competencia entre el inicio del desarrollo foliar y de los frutos, y las últimas floraciones, puede ocurrir pérdida de yemas florales y diferencias en el desarrollo de los frutos.

En la Tabla 3.9 se muestra, para altas densidades (10.000 plantas/ha) cómo la planta de café distribuye

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** El fenómeno de “agotamiento” de los cafetos observado en algunos países cafeteros, puede mirarse básicamente como un desequilibrio en la relación fuente-vertedero, por una alta concentración de la cosecha y limitación del crecimiento de las raíces. En Colombia este fenómeno es de rara ocurrencia, debido a una menor concentración de la cosecha, una continua formación y mayor duración del follaje, a unas condiciones físicas del suelo favorables para un buen desarrollo de raíces y a la disponibilidad de agua casi permanente.

Un aspecto de gran interés en la repartición de asimilados en la planta de café es la ocurrencia de fotosíntesis en los frutos en desarrollo, los cuales pueden representar entre el 2 y el 30% de la superficie fotosintética total en árboles con cosecha abundante.

En Colombia, en algunas zonas con deficiencias hídricas severas es frecuente encontrar el fenómeno de grano negro, el cual además de una deficiencia hídrica en la fase de crecimiento acelerado de los frutos, podría estar asociado también a problemas de limitación de la fuente.

**Tabla 3.9.** Distribución de la materia seca en cinco variedades de *C. arabica* L. (Arcila, 1990).

Parte de la planta	Porcentaje del peso seco total de la planta				
	Caturra	Colombia	Catuai	Erecta	Caturra x San Bernardo
Raíz	16-19	13-15	14-17	13-17	13-17
Tallo	21-32	28-32	26-32	21-34	16-27
Ramas	18-23	18-24	18-25	21-30	22-39
Hojas	19-29	19-27	19-30	21-30	21-38
Frutos	7-16	4-17	2-12	6-14	3-14
Parte aérea	81-84	85-87	82-88	85-87	83-87

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** La cosecha de un semestre depende de la cantidad de ramas y nudos formados en el semestre anterior. Sin embargo, de estas ramas y nudos solamente es apta para producir aquella fracción que tenga la edad adecuada. Las ramas y nudos menores de 3 meses no están en capacidad para producir, mientras que en los nudos más viejos donde ya se produjo, no se vuelve a obtener producción. Esto significa que el potencial de producción por cafeto en un semestre determinado dependerá del número de nudos formados el semestre anterior, que estén aptos para florecer, y del número de frutos que se generen en cada nudo. Existe un potencial de formación de 30 a 35 frutos en cada nudo, pero en la práctica y por efecto de múltiples factores, solamente se obtienen entre 8 y 10 frutos por nudo.

en la parte área entre el 80 y 85% del peso seco total de la planta y en las raíces aproximadamente el 15%. Las hojas representan entre el 19 y el 30%, y el índice de cosecha varió entre 5 y 15% .

El término índice de cosecha es de difícil aplicación para la planta de café, por su carácter perenne y crecimiento vegetativo y reproductivo continuo.

La presencia de la roya del cafeto en Colombia, ha alterado este equilibrio de la planta, en su relación fuente-vertedero, limitando de una parte la fuente por la pérdida de superficie foliar y la alteración del metabolismo fotosintético, y alterando el vertedero, el cual se incrementa. El resultado es similar al del exceso de fructificación descrito.

## Componentes de la producción y la productividad de *Coffea arabica*

### Producción por árbol (componentes de la producción)

La capacidad productiva de la planta de café está directamente ligada a la capacidad genética de cada variedad y su grado de expresión, es decir, la cantidad, la calidad y la distribución de la cosecha dependen de la interacción con el ambiente y las prácticas de manejo. El potencial de producción de la planta varía de año en año, y está determinado por la cantidad de ramas formadas sobre el tallo principal, la cantidad de nudos formados en las ramas (Figuras 3.12A y 3.12B), la cantidad de frutos formados en los nudos que alcancen a llegar a la maduración, y por el rendimiento en términos de la conversión de café cereza a café pergamino seco y a café trillado (Salazar *et al.*, 1989; Cannell, 1973). Estas variables son denominadas componentes de producción del cafeto y mediante su integración en una expresión de tipo multiplicativa como la siguiente, puede tenerse una aproximación a un potencial de producción:

$$P(\text{Planta}) = NR \times Nuf \times FNu \times PF \times FC$$

Donde:

P = Producción

NR = Número de ramas con producción

Nuf = Número de nudos con frutos por rama

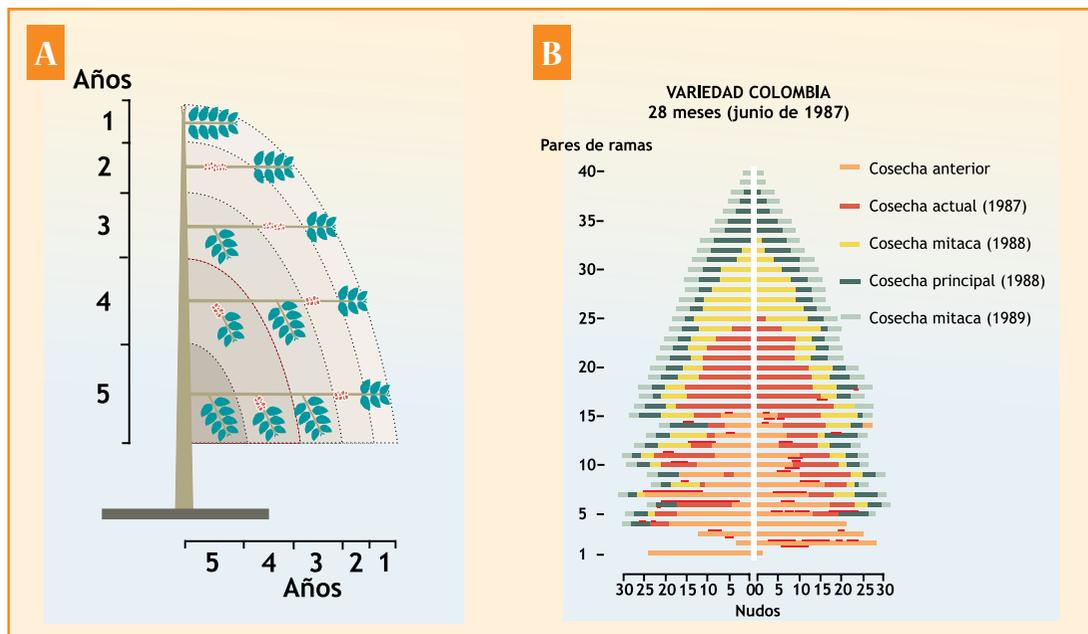


Figura 3.12 A). Representación esquemática del crecimiento del cafeto durante un ciclo de producción de 5 años; B). Periodicidad del crecimiento y desarrollo vegetativo y reproductivo del cafeto en una planta de 30 meses (Arcila, 1990).

FNu = Número de frutos por nudo  
 PF = Peso por fruto  
 FC = Factor de conversión de café cereza a café pergamino seco (cc/cps)

**Efecto del sombrío sobre los componentes de producción de la planta.** En una investigación realizada por Castillo y López (1966), se sometieron plantas de café variedad Borbón, a intensidades de sombra de 25, 50, 75 y 100%. Se encontró que el número de nudos por rama, el número de hojas, el número de glomérulos con flores y el número de flores por nudo, disminuía a medida que se aumentaba la cantidad de sombra (Figura 3.13).

**Competencia entre el crecimiento vegetativo y reproductivo.** Durante el ciclo de vida de la planta de café y especialmente en las regiones ecuatoriales donde no hay una alternancia bien definida de períodos húmedos y secos, como sería el caso de la zona cafetera colombiana, se presenta una superposición de estados vegetativos y reproductivos, por ejemplo:

Llenado de la cosecha del primer semestre con las floraciones para la cosecha del segundo semestre; la cosecha del primer semestre con el crecimiento rápido de los frutos para la cosecha del segundo semestre; las floraciones para la cosecha del primer semestre con el llenado de la cosecha para el segundo semestre; el crecimiento rápido de los frutos para la cosecha del primer semestre con la maduración de los frutos para la cosecha del segundo semestre. Esta superposición de etapas origina la competencia por asimilados entre órganos y entre los estados vegetativos y reproductivos, y podría alterar la época de ocurrencia y escalamiento de los estados y la cantidad y calidad de la cosecha, y explican en parte el fenómeno de la **bialidad de la producción**.

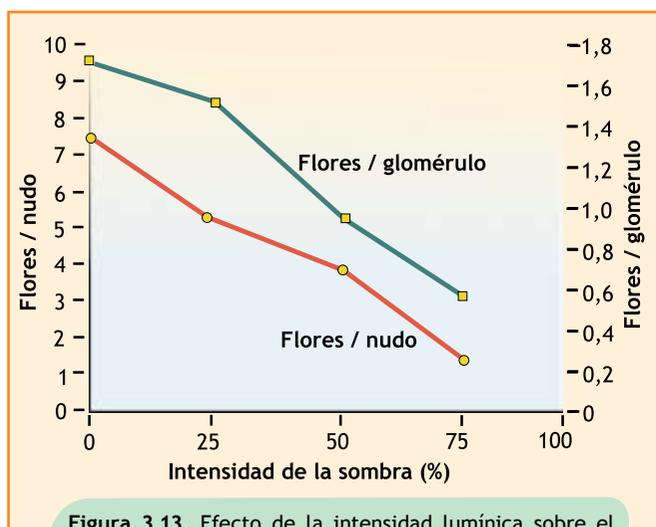


Figura 3.13. Efecto de la intensidad lumínica sobre el desarrollo de nudos y flores en la planta de café. Adaptado de Castillo y López (1966).

## Producción por hectárea

El otro elemento determinante de la producción de la finca está relacionado con la producción por unidad de superficie y la cantidad de área sembrada.

La producción de la planta en comunidad (por ejemplo, la producción por hectárea) estará afectada por factores como: densidad (número de sitios sembrados o número de plantas o de tallos), edad, cantidad de radiación incidente, cantidad de sombrío, temperatura, precipitación, fertilización (suelo) y control de arvenses, plagas o enfermedades, entre otros. El modelo básico para estimar la producción por hectárea es el siguiente:

$$\text{Producción/ha} = \text{Número de plantas/ha} \times \text{Producción/Planta}$$

Este modelo se puede volver más complejo en la medida que se le incorporen otras variables asociadas con los factores determinantes de la producción discutidas anteriormente.

**Cantidad y calidad de cosecha.** Entre todos los componentes del sistema de producción debe darse un equilibrio, para que el resultado final se refleje en una alta productividad y calidad de la cosecha.

Cuando por diversas circunstancias, uno o varios de los componentes no se encuentra en un nivel adecuado, la cantidad y la calidad de la cosecha se verán afectados por el desequilibrio en uno o varios de los componentes del sistema. A continuación se presentan las principales propiedades físicas y factores de conversión asociados al sistema de producción de café.

**CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.** Para la obtención de una alta producción por unidad de área, el modelo tecnológico que se utilice debe permitir mantener la mayor cantidad de nudos productivos por área, con la mayor cantidad de frutos por nudo y el mayor peso de granos por fruto.

## Algunas propiedades físicas y factores de conversión del café

Las constantes físicas del café son las relaciones físicas existentes entre el peso y el volumen, el contenido de humedad y otras características del fruto del café, teniendo en cuenta los diferentes estados en que se puede transformar el producto desde

cereza madura hasta café almendra. Además, son un instrumento útil para evaluar el sistema productivo, facilitan las operaciones comerciales, el diseño de los beneficiaderos, así como el diseño y calibración de los diferentes dispositivos y máquinas empleados en el proceso de beneficio del café. Los factores de conversión son importantes en la economía del café, pues los caficultores basan sus decisiones comerciales en estos.

Las propiedades físicas y los factores de conversión en café que se tienen actualmente como referencia para la producción de café en Colombia, fueron publicados hace más de dos décadas por Uribe (1977). Cuando se formularon estas constantes no se discriminaron las posibles diferencias por factores propios del proceso de producción como la variedad cultivada, el tipo de manejo agronómico, la edad del cultivo, la región geográfica y la altitud, entre otros. Así mismo, también han ocurrido cambios sustanciales en el proceso de beneficio y adicionalmente otros factores como la llegada de la roya (*Hemileia vastatrix*) y la broca (*Hypothenemus hampei*), que afectan el rendimiento del proceso productivo del café. Montilla (2006), realizó una caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café desde fruto maduro hasta grano almendra, en la variedad Colombia. Los frutos se recolectaron en fincas de los municipios de Chinchiná, Manizales, Villamaría y Palestina (Caldas), en tres etapas de la cosecha del segundo semestre del 2005. Se emplearon dos tipos de muestras, una de café maduro seleccionado sin defectos y otra sin seleccionar, y para cada muestra se tomaron submuestras que fueron sometidas a análisis físicos y mediciones. A continuación se hace la comparación de los datos

obtenidos en este experimento con los resultados de Uribe (1977). En las Tablas 3.10 y 3.11 se presentan las variables que no son comunes y en las Tablas 3.12, 3.13 y 3.14 se muestran los valores promedio obtenidos para las variables evaluadas que son comunes en los dos estudios.

De los datos de la Tabla 3.10 se puede inferir que para el café pergamino y el café almendra, la labor de seleccionar la muestra antes de iniciar el beneficio es una práctica importante para disminuir los defectos y mantener la calidad del café. La Tabla 3.12 muestra que los valores para las densidades aparentes del café en todos sus estados fueron mayores que los encontrados por Uribe (1977); mientras que Oliveros y Roa (1985), registran valores de 665 kg.m<sup>-3</sup>, 894 kg.m<sup>-3</sup>, 758 kg.m<sup>-3</sup>, 439 kg.m<sup>-3</sup> y 776 kg.m<sup>-3</sup> para el fruto, el café en baba, el café lavado, el café pergamino seco y el café almendra, respectivamente.

Según los datos de Montilla (2006), en los dos tipos de muestras evaluadas, fueron mayores los valores de las relaciones café cereza/café baba, café cereza/café lavado, café cereza/café pergamino, café cereza/café almendra, café baba/café almendra, café lavado/café pergamino, café lavado/café almendra y café pergamino/pulpa fresca (Tabla 3.13); mientras que para las relaciones café cereza/pulpa fresca y café baba/café lavado estos valores fueron menores. Finalmente, para las relaciones café baba/café pergamino y café pergamino/café almendra los datos fueron semejantes en los dos estudios. No obstante, en la práctica las relaciones de conversión de los dos estudios son muy similares y están dentro de los parámetros que se utilizan actualmente

**Tabla 3.10.** Calidad del café en frutos, café pergamino seco y en almendra, var. Colombia

	Montilla (2006)	
	Café seleccionado	Café sin seleccionar
<b>Calidad de la masa recién cosechada (%)</b>		
Granos verdes	0	9,45
Granos sobremaduros	0	6,13
Granos secos	0	4,48
Granos perforados por broca	0	6,04
<b>Calidad de la masa en pergamino (%)</b>		
Grano guayaba	0,85	2,67
Grano pelado	0,33	0,76
Impurezas	0,39	0,83
Total defectos	1,58	4,27
<b>Calidad de la masa en almendra (%)</b>		
Grano vinagre	0,43	0,83
Grano decolorado veteado	0,41	0,67
Grano mordido o cortado	1,33	1,93
Grano brocado	1,81	3,72
Grano astillado o partido	0,82	0,94
Grano inmaduro	0,23	0,47
Otros defectos	0,36	0,56
Total defectos	5,41	9,12

para la comercialización y calificación de la calidad del café. Es difícil dar una explicación a las diferencias debido a que en el trabajo de Uribe (1977), se trabajó con café var. Caturra en ausencia de la roya y la broca, y no se especificó el tipo de muestra ni las metodologías empleadas para los análisis.

De acuerdo a los datos en la Tabla 3.11, la muestra seleccionada tuvo el valor más alto de café almendra después de trilla; por tanto, se obtiene más café pergamino en buen estado y mayor porcentaje de café supremo (retenido en malla 17).

**Tabla 3.11.** Análisis granulométrico del café almendra.

	Café seleccionado	Café sin seleccionar
Peso después trilla (g)	194,08	185,39
Café almendra en malla 17 (%)	73,32	67,32
Café almendra en malla 16 (%)	16,96	18,93
Café almendra en malla 15 (%)	6,83	8,76
Café almendra en malla 14 (%)	2,33	3,75
Café almendra en malla 12 (%)	0,50	1,15
Café almendra en malla 0 (%)	0,04	0,05

**Tabla 3.12.** Propiedades físicas del café var. Colombia.

	Uribe (1977)	Montilla (2006)	
		Café seleccionado	Café sin seleccionar
<b>Densidad aparente (kg m<sup>-3</sup>)</b>			
Fruto	600	621,57	616,50
Pulpa fresca	270	299,74	298,20
Grano de café baba	800	826,71	803,40
Grano de café lavado	650	701,87	693,66
Grano de café escurrido	s.d.	687,17	678,31
Grano de café seco de agua	520	s.d.	s.d.
Grano de café pergamino	380	391,44	385,75
Grano de café almendra	680	709,99	707,31
<b>Peso (g)</b>			
Un fruto	2,00	1,99	1,85
Un grano de café baba	s.d.	0,57	0,55
Un grano de café lavado	s.d.	0,40	0,39
Un grano de café escurrido	s.d.	0,39	0,38
Un grano de café pergamino	0,22	0,21	0,21
Un grano de café almendra	0,18	0,18	0,18
<b>Diámetros (mm)</b>			
<b>Diámetro ecuatorial</b>			
Fruto	s.d.	14,37	13,99
Grano de café baba	s.d.	9,24	9,02
Grano de café lavado	s.d.	8,70	8,63
Grano de café escurrido	s.d.	8,80	8,64
Grano de café pergamino	s.d.	8,55	8,43
Grano de café almendra	s.d.	7,11	7,04
<b>Diámetro polar</b>			
Fruto	s.d.	15,96	15,77
Grano de café baba	s.d.	12,72	12,35
Grano de café lavado	s.d.	12,31	12,22
Grano de café escurrido	s.d.	12,38	12,03
Grano de café pergamino	s.d.	12,01	11,87
Grano de café almendra	s.d.	9,69	9,48

s.d.: sin dato

**Tabla 3.13.** Relaciones de conversión de las variedades Caturra (Uribe, 1977) y Colombia (Montilla, 2006).

	Uribe (1977)	Montilla (2006)	
		Café seleccionado	Café sin seleccionar
La pulpa representa en el fruto (%)			
En base húmeda	40	44,02	43,58
En base seca	s.d.	20,35	20,40
El grano representa en el fruto (%)			
En base húmeda	60	55,98	56,42
En base seca	s.d.	49,41	48,84
El agua representa en el fruto (%)	s.d.	30,24	30,76
Relación café cereza/café baba	1,67	1,81	1,80
Relación café cereza/café lavado	2,43	2,56	2,46
Relación café cereza/café pergamino	4,5	4,94	4,89
Relación café cereza/café almendra	5,56	6,23	6,23
Relación café cereza/pulpa fresca	2,4	2,30	2,33
Relación café baba/café lavado	1,46	1,41	1,37
Relación café baba/café pergamino	2,71	2,74	2,71
Relación café baba/café almendra	3,39	3,43	3,44
Relación café lavado/café seco de agua	1,26	s.d	s.d.
Relación café lavado/café pergamino	1,85	1,93	1,97
Relación café lavado/café almendra	2,31	2,42	2,51
Relación café pergamino/café almendra	1,25	1,25	1,26
Relación café pergamino/pulpa fresca	0,56	0,46	0,48
Porcentaje de merma en trilla	18,00	17,75	18,40
Rendimiento en trilla	s.d	90,75	95,99

S.d. Sin dato

Con base en los resultados anteriores se han establecido los factores de conversión para realizar las transformaciones entre los estados del grano de café (Tabla 3.14).

De acuerdo con la época de cosecha se observaron algunas variaciones en las propiedades físicas y los factores de conversión. Esto se explica porque las condiciones climáticas y el volumen y la distribución de la cosecha son específicas de cada año. Un café sometido a una selección rigurosa para eliminar la mayor cantidad de defectos, escogiendo sólo cerezas maduras, presenta las mejores características físicas y por tanto, mejores rendimientos y calidad del café. Las relaciones de conversión fueron muy similares entre los tipos de muestra. El porcentaje de merma y el rendimiento estuvieron en los rangos óptimos de calidad en la muestra seleccionada y justifican la labor de seleccionar el café antes del beneficio. Y, se considera que los rendimientos pueden ser aún mejores, ya que se observaron deficiencias en la calidad de la masa que representaron un porcentaje de pasillas de 5,41 y 9,19% para el café seleccionado y sin seleccionar, respectivamente, siendo el límite máximo permitido por

la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia de 5,5%, en las normas de calidad de café.

### Sistemas de producción de café

Un sistema de producción se define como el conjunto de factores y opciones tecnológicas que al interactuar entre ellos, permiten obtener la máxima productividad desde el punto de vista biológico, económico y social.

El sinnúmero de características edafológicas, climáticas y socioeconómicas en que se cultiva el café en Colombia da lugar a una amplia gama de sistemas de producción. En Colombia se pueden distinguir los siguientes sistemas de producción de café:

**Sistemas de producción de café a libre exposición solar.** Se desarrollan bien en las zonas con suelos aptos en cuanto a características físicas y de fertilidad, y una apropiada disponibilidad de energía solar y de agua (regímenes de lluvia suficiente para las necesidades del cafeto y muy buena distribución durante todo el año). En

**Tabla 3.14.** Factores de conversión para realizar transformaciones entre los estados del grano de café.

Para convertir de	A	Multiplique por		
		Uribe (1977)	Montilla (2006)	
			Café seleccionado	Café sin seleccionar
Cereza	Pergamino	0,22	0,20	0,20
	Baba	0,60	0,55	0,55
	Almendra	0,18	0,16	0,16
	Seco de agua	0,32	s.d	s.d
	Húmedo	0,41	0,39	0,41
	Pulpa fresca	0,40	0,43	0,43
	Pulpa mojada	0,48	s.d	s.d
Pergamino	Cereza	4,50	4,94	4,89
	Almendra	0,80	0,80	0,79
	Baba	2,71	2,74	2,71
	Húmedo	1,85	1,93	1,97
	Seco de agua	1,46	s.d	s.d
	Pulpa fresca	1,77	2,15	2,09
	Pulpa mojada	2,13	s.d	s.d
Baba	Pergamino	0,37	0,36	0,37
	Almendra	0,29	0,29	0,29
	Cereza	1,67	1,81	1,80
	Húmedo	0,95	0,71	0,73
	Seco de agua	0,54	s.d	s.d
Almendra	Pergamino	1,25	1,25	1,26
	Baba	3,39	3,43	3,44
	Cereza	5,56	6,23	6,23
	Húmedo	2,31	2,42	2,51
	Seco de agua	1,82	s.d.	s.d.
Húmedo*	Seco de agua	0,79	s.d.	s.d.
	Pergamino	0,54	0,51	0,50
	Cereza	2,43	2,56	2,46
	Baba	1,46	1,41	1,37
	Almendra	0,43	0,41	0,40
Seco de agua	Pergamino	0,68	s.d.	s.d.
	Cereza	3,09	s.d.	s.d.
	Húmedo	1,26	s.d.	s.d.
	Baba	1,84	s.d.	s.d.
	Almendra	0,54	s.d.	s.d.
Pulpa fresca	Cereza	2,40	2,30	2,33
	Pergamino	0,56	0,46	0,48
	Mojada	1,20	s.d.	s.d.
Pulpa mojada	Cereza	2,08	s.d.	s.d.
	Pergamino	0,47	s.d.	s.d.
	Fresca	0,83	s.d.	s.d.

\*café lavado; s.d. Sin datos.

este tipo de sistemas se utilizan densidades de siembra altas, entre 7.500 y 10.000 plantas por hectárea y son altamente productivos (2.500 - 4.000 kg café pergamino seco por hectárea). Cerca del 30% de la caficultura colombiana se encuentra a plena exposición solar.

**Sistemas agroforestales con café (café bajo sombra).** En estos sistemas se utilizan árboles para proporcionar diferentes niveles de sombrío dependiendo de la especie y el arreglo espacial. Se emplean principalmente en zonas con limitaciones para un adecuado desarrollo del

cultivo, por condiciones climáticas o de suelos, ya sea por la presencia de períodos secos prolongados o de suelos con limitaciones físicas y de fertilidad o erosionados. En estos sistemas la densidad de siembra óptima (2.000 a 3.000 plantas por hectárea) y la productividad (500 - 1.000 kg café pergamino seco por hectárea) son menores que en cafetales a libre exposición. Cerca del 70% de la caficultura colombiana se encuentra bajo algún tipo de sombrío.

Un importante número de caficultores que no poseen los recursos económicos suficientes para sostener adecuadamente sus predios, la mayor parte de ellos con áreas muy pequeñas en café, con predominio de variedades de porte alto, de mucha edad, con un manejo mínimo del cultivo y donde la renovación es prácticamente nula, optan por el sistema de cultivo de café bajo sombra.

En ambos sistemas de producción se puede tener el café a libre crecimiento o con podas y con tallos simples o tallos múltiples.

**Sistemas de producción de cafés especiales.** Recientemente oportunidades específicas de mercado han estimulado el surgimiento de otros sistemas de producción denominados “cafés especiales”, los cuales requieren el cumplimiento de normas específicas ya sea para la producción o en las características del producto para un mercado particular. Entre estos sistemas se destacan los siguientes:

Cafés de origen (regionales, exóticos, de finca).  
Cafés sostenibles o de conservación (orgánicos, amigables con las aves o de sombra y, de precio justo o social).