



# Sistemas de producción: Conceptos y definiciones

Fernando Farfán Valencia\*

\* Investigador Científico II, Disciplina de Fitotecnia, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé.  
<https://orcid.org/0000-0003-0976-8828>

Farfán-Valencia, F. (2020). Sistemas de producción: conceptos y definiciones. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café (pp. 14--33). Cenicafé. [https://doi.org/10.38141/10791/0002\\_1](https://doi.org/10.38141/10791/0002_1)



**L**a ciencia y la tecnología son el fundamento y el soporte de todas las actividades productivas artesanales o empresariales de los seres humanos; por lo tanto, es importante tener principios y conceptos amplios sobre lo que es un sistema de producción, para entenderlo en toda su dimensión y así poder acudir con precisión y oportunidad a la Fitotecnia como tecnología de la producción agrícola. Para que pueda ser exitosa la actividad agrícola empresarial tiene necesariamente que usar conocimiento científico y tecnológico, junto con un proceso administrativo eficaz y eficiente.

Al tener una visión de sistemas ante la producción agrícola, se da la posibilidad de entender lo que ocurre en la finca como sistema dinámico global y cada uno de sus subsistemas, donde el sistema de producción de café, con sus componentes y sus subsistemas, funcionarán hacia los objetivos propuestos, como resultado de las decisiones (Moreno, 2007); objetivos enfocados hacia la productividad y rentabilidad de la caficultura como sistemas.

## ¿Qué es un sistema?

Un sistema es un conjunto, una combinación, un complejo de diversas estructuras (económicas, técnicas, institucionales, etc.) coherentes, que están ligadas entre sí por relaciones relativamente estables. También se define como un conjunto de elementos o componentes en interacción dinámica, organizados en función de una finalidad u objetivo.

## ¿Qué es un ecosistema?

Es una parte de la biosfera definida en función de las interrelaciones entre los seres vivos y su medio ambiente; dicho de otra manera, es la unidad básica de observación de los procesos que ocurren en la naturaleza. El ecosistema es la base unitaria de la estructura y funcionamiento de la naturaleza y se caracteriza por tener una serie de elementos bien definidos y establecidos, como sus límites, entradas y salidas o flujos, y componentes, entre otros (Fassbender, 1993).

## ¿Qué es un sistema de producción agrícola?

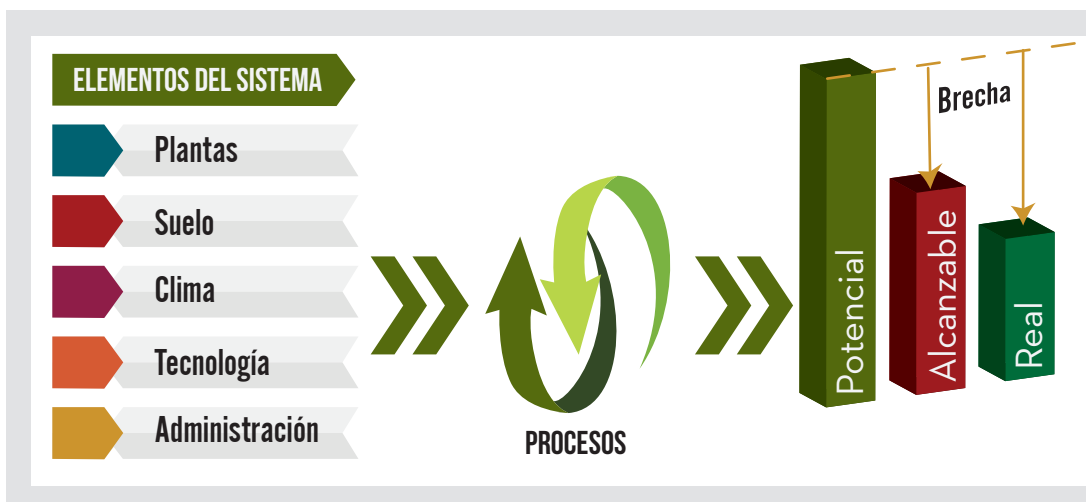
Un sistema de producción agrícola es un ecosistema que cambia, maneja y administra el hombre, con el fin de producir bienes que le son útiles. Para modificar estos ecosistemas el hombre utiliza los factores de producción.

Del mismo modo, un sistema de producción agrícola es un conjunto de actividades donde participan pequeños, medianos y grandes productores, quienes organizan, dirigen y administran los sistemas orientados a unos objetivos propuestos; empleando prácticas y tecnologías, de acuerdo a su medio físico, para obtener diferentes producciones agrícolas (Duarte et al., 1996). También se define como la forma en que se combinan, en el tiempo y en el espacio, los factores de producción (tierra, mano de obra, capital, etc.) que el agricultor administra para cumplir sus objetivos sociales y económicos.

Visto de otra manera, un sistema de producción agrícola es una actividad dirigida a transformar componentes abióticos (oferta ambiental) por medio de componentes bióticos (genotipo), en arreglos espaciales y cronológicos con prácticas adecuadas de manejo, en productos de importancia económica. Por ejemplo, la planta de café (genotipo) transforma  $\text{CO}_2$ , agua, energía solar y minerales, en cerezas de café. La Fitotecnia es la tecnología propia de los sistemas de producción agrícola, la cual es una visión y un sistema de conocimientos multidisciplinarios, para producir con calidad, rentabilidad y sostenibilidad. Al respecto, es importante tener en cuenta que, al aplicar tecnología a un sistema de producción, el propósito debe ser reducir la brecha que existe entre el potencial de producción y la producción real. Por lo tanto, es clave identificar los elementos del sistema que más contribuyen a la producción final (Moreno, 2007), como se presenta en la Figura 1.

## Sistemas de producción de café

Un sistema de producción de café 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. La FNC (1993) como parte operativa para el alinderamiento de los lotes cafeteros, mediante aerofotografía, sugirió como conceptos básicos a ser aplicados, entre otros, los siguientes:



**Figura 1.** Relación entre algunos elementos de un sistema de producción agrícola y su producción (Moreno, 2007).

**Lote cafetero a plena exposición solar.** Es aquel en el cual el efecto de la regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea permanente, inferior a 20 árboles por hectárea o inferior de 300 especies arbustivas semipermanentes.

**Lote cafetero con semisombra.** Es aquel en el cual el efecto de la regulación de la luz incidente proviene de cualquier especie arbórea superior a 20 e inferior a 50 árboles por hectárea o cualquier especie arbustiva semipermanente, con más de 300 y menos de 750 sitios por hectárea.

**Lote cafetero con sombra.** Cuando el efecto de la regulación de la luz incidente se debe a la presencia de cualquier especie arbórea permanente con densidad superior a 50 árboles por hectárea, igual a una distancia de siembra aproximada de 14,0 x 14,0 m o cualquier especie arbustiva semipermanente, con más de 750 sitios por hectárea, es decir, distancias de siembra de 3,7 x 3,7 m.

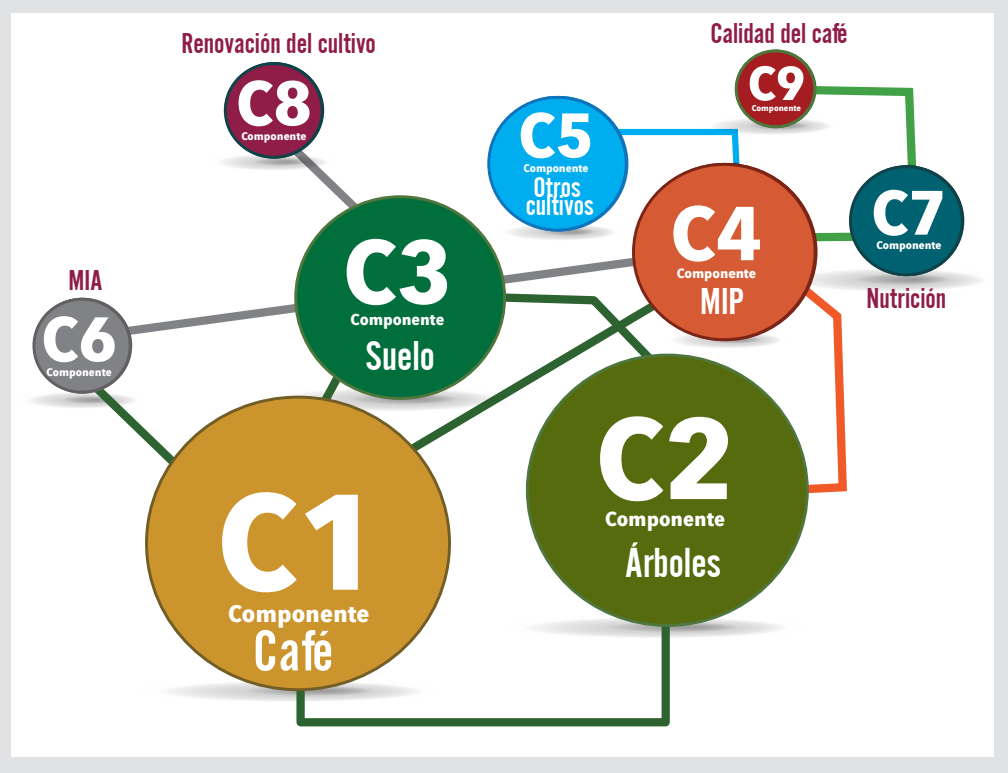
## Elementos de un sistema de producción

Los elementos de un sistema de producción mencionados por Martínez (2009), y Escobar y Berdegue (1990), son:

**Los límites del sistema.** Se definen como la línea común que divide dos predios (fincas, lotes, etc.), entendiendo el predio como aquel espacio que guarda cierto grado de homogeneidad con respecto a otros espacios.

**Las entradas.** Se definen como los flujos que provienen del medio exterior al sistema de producción; las entradas más usuales de un sistema de producción agrícola son agua, sol, insumos, asistencia técnica, créditos y mano de obra, entre otros.

**Los componentes.** Son los elementos básicos y las unidades identificables del sistema. Pueden ser físicas como cultivos de café, cultivos asociados al café, etc. (Figura 2).



**Figura 2.**  
Componentes de un sistema de producción de café.

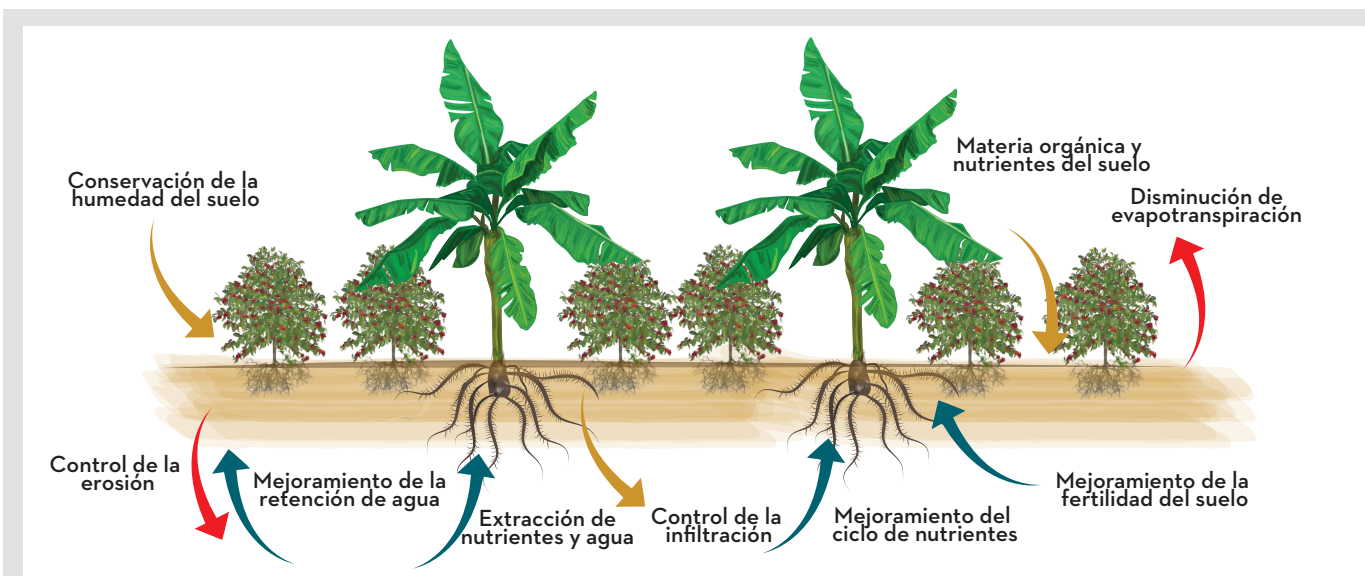
**Las interacciones.** Conjunto de relaciones que especifican la naturaleza de las conexiones y los modos de relación entre los componentes del sistema. El consumo de nutrientes en un cultivo de café es una interacción entre el cultivo y el suelo. La incorporación de nitrógeno al suelo por parte de leguminosas como sombríos transitorios, en una interacción suelo-planta (Figura 3).

**Las salidas.** Son aquellos flujos que van del sistema de producción hacia el exterior. Las cantidades vendidas de productos agrícolas, por ejemplo, café pergamino seco, los jornales invertidos en otros subsistemas, las pérdidas de suelos por erosión, entre otros, son ejemplos de salidas de un sistema agrícola. En la Figura 4 se presenta un sistema de producción de café.

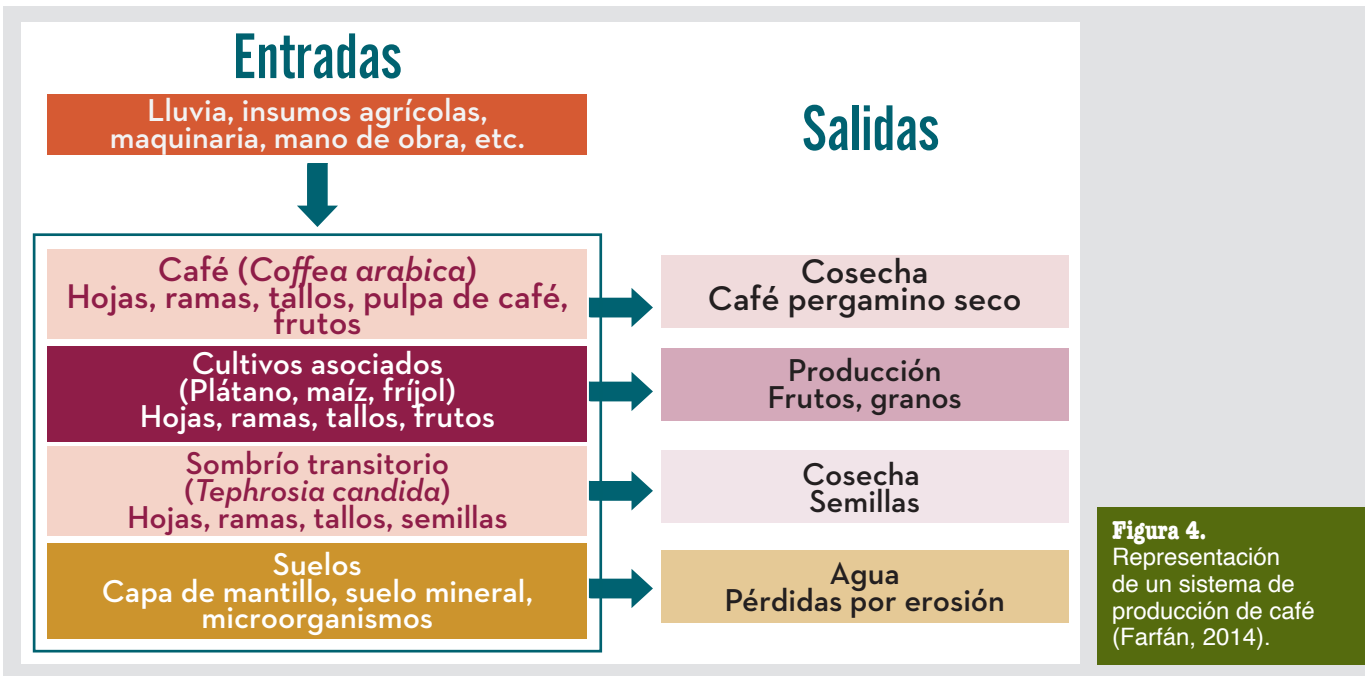
## Relaciones Suelo-Planta-Clima de un sistema de producción con café

La región cafetera se encuentra ubicada entre las altitudes de 1.000 y 2.000 m en la región Andina, donde se presentan interacciones entre la topografía y los elementos meteorológicos. Las dimensiones y orientaciones de las montañas respecto a los vientos prevalentes influyen sobre los procesos a gran escala; el relieve y la forma del terreno a escala regional, y la inclinación de la pendiente y su aspecto causan diferencias locales de clima (Jaramillo, 2005 a, b).

La radiación solar, la temperatura, la humedad del aire, el viento y la lluvia



**Figura 3.**  
Algunas interacciones en un sistema de producción de café.



**Figura 4.**  
Representación de un sistema de producción de café (Farfán, 2014).

son elementos climáticos que están estrechamente relacionados con el crecimiento y desarrollo de la planta, mientras que procesos como la toma de agua y de nutrientes, la germinación de las semillas, la diferenciación y crecimiento de los órganos vegetales,

estados fenológicos (vegetativo, floración, fructificación) son influenciados y dependientes de las interacciones planta – clima.

El agua que circula en el sistema suelo – planta – clima proviene principalmente

del aporte de las lluvias, convirtiéndose la cantidad de agua que entra al sistema, en un factor determinante y clave en las diferentes interacciones.

## El suelo

El suelo es un medio que además de brindar soporte, anclaje y nutrientes a las plantas, influye en el crecimiento y desarrollo de las raíces mediante las interacciones de sus propiedades físicas y químicas. Los suelos de la zona cafetera son heterogéneos en estas propiedades; la materia orgánica, el pH, la acidez y el contenido nutricional son las propiedades químicas de mayor influencia en el desarrollo vegetativo y productivo. Las propiedades físicas destacadas son la densidad aparente (DA), la densidad real (DR), la porosidad, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento (CA) (Haynes, 2005). El crecimiento deseable de un cultivo depende de las condiciones físicas y químicas del suelo, entre las que se destacan:

### Características físicas y químicas de los suelos cafeteros colombianos

Los suelos de la zona cafetera colombiana son relativamente jóvenes y han sido agrupados en metamórficos, ígneos y sedimentarios. Por su ubicación sobre distintos tipos de relieve, pueden clasificarse como planos o ligeramente

ondulados hasta abruptos, con pendientes superiores al 75%. También varían en las condiciones físicas, desde pedregosos y arenosos hasta francos y arcillosos; y químicas con contenidos bajos a altos de materia orgánica y minerales esenciales.

### Características químicas

**Materia orgánica (MO).** La materia orgánica es considerada como un indicador de la productividad del suelo. Entre las funciones que desempeña pueden señalarse: es fuente de nutrimentos (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.

Se concibe como el recurso natural regulador de las condiciones físicas, químicas y biológicas en el suelo. Para el cultivo del café, valores de MO <8,0% se consideran como bajos (Sadeghian, 2008). Estudios realizados por González et al. (2008) en suelos de la zona cafetera colombiana, encontraron que los contenidos de MO en los primeros 30 cm del suelo estaban entre el 6,8% y 17,7%; las unidades de suelos que presentaron mayor contenido de MO fueron Chinchiná, Doscientos, Tablazo, Guamal, Cascarero y Maiba (Tabla 1).

**Tabla 1.**

Contenidos de materia orgánica en los primeros 30 cm, en algunas unidades de suelos de la zona cafetera.

Unidad de suelos	Libre exposición solar	Sistema agroforestal
	MO (%)	MO (%)
Chinchiná	17,70	14,50
Guamal	11,73	8,50
Doscientos	12,01	12,00
Tablazo	11,95	10,90
Maiba	7,85	6,80
Cascarero	8,20	7,50

**El pH.** 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.

Un suelo se acidifica por pérdida de bases intercambiables ocasionadas por la lluvia, la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del azufre, la nitrificación del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y el uso de fertilizantes nitrogenados. Existe una relación inversa entre el pH y los contenidos de  $\text{Al}^{+3}$ , el cual resulta tóxico para las plantas y para los microorganismos encargados de la mineralización de la materia orgánica (Sadeghian, 2016).

Los nutrientes y otros compuestos se presentan en un estado dinámico en el suelo. Se añaden o remueven de manera continua mediante diversas vías. La fertilidad de un suelo depende de las tasas relativas de adición y remoción de los nutrientes.

El café requiere 16 elementos que se consideran esenciales para su crecimiento. Las cantidades que necesita la planta están determinadas por la variedad, la etapa de desarrollo, el nivel de producción, los factores climáticos, las propiedades del suelo y el manejo de la plantación. Los requerimientos nutricionales en etapa vegetativa son N, P, y K; en la fase productiva, el café requiere básicamente N, P, K, Ca y Mg. Es posible que, para el acondicionamiento del sitio de siembra

del café, sea necesario la aplicación de enmiendas o el encalamiento (Sadeghian, 2008).

### Características 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. 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, y temperatura adecuada.

**Densidad aparente (DA).** Se define como la relación entre el peso del suelo seco y el volumen que ocupa, incluyendo su espacio poroso; es una de las propiedades físicas del suelo de mayor importancia, ya que se relaciona directamente con el movimiento del agua y los nutrientes en el suelo. La DA es influenciada por las partículas sólidas, por el espacio poroso del suelo y por la MO. La DA condiciona el flujo de los nutrientes hacia las raíces a través de los poros del suelo y afecta el crecimiento de las raíces (González, 2013).

La densidad aparente típica de un suelo mineral de textura media está alrededor de  $1,25 \text{ Mg m}^3$  (megagramos por metro cúbico), y varía dependiendo de la textura y las prácticas de uso y manejo del suelo. Un valor de  $\text{DA} \geq 1,5 \text{ g cm}^3$  puede limitar el crecimiento de raíces de la planta de café. 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 y la compactación afecta las condiciones de retención de humedad, limita el crecimiento de raíces y la absorción



normal de nutrimentos y del agua, impide la actividad microbiana, reduce la infiltración e induce a cambios en la estructura y el comportamiento funcional del suelo.

Las propiedades del suelo que muestran relación directa con la DA son la densidad real y la resistencia a la penetración; y una relación negativa con la porosidad total, la humedad a capacidad de campo, la humedad a punto de marchitez permanente, el contenido de MO, la estabilidad de los agregados y el porcentaje de limos (Salamanca y Sadeghian, 2004).

**Porosidad.** La porosidad determina la condición de aireación y drenaje para el desarrollo de las plantas, el crecimiento de raíces y microorganismos en el suelo (Suárez, 2001). Si el suelo tiene un gran porcentaje de arenas y posee muchos macroporos, se produce un mayor drenaje de agua y nutrientes (lixiviación), condición que afecta la nutrición de la planta y su producción (Sadeghian y Jaramillo, 2017).

**Capacidad de almacenamiento.** Propiedades físicas como la textura y químicas como el contenido de materia orgánica, influyen sobre la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Esta es determinante al construir el balance hídrico, la especificación de necesidades de drenajes y la retención de humedad para riego, entre otros (Suárez, 1998, 2000).

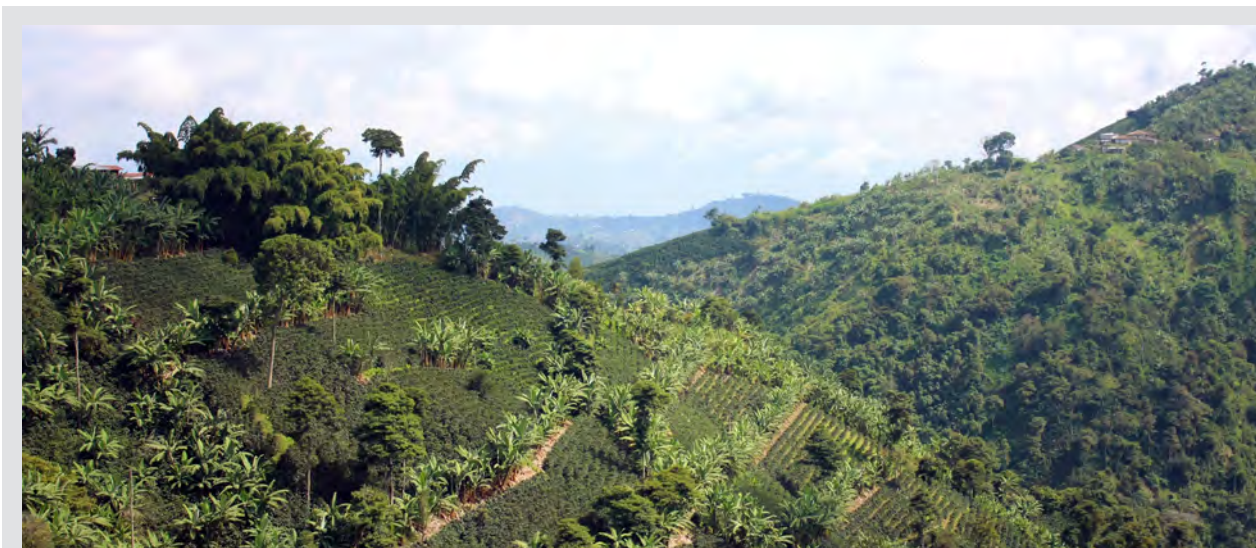
**Textura y estructura.** Las mejores condiciones físicas se presentan en los suelos provenientes de cenizas volcánicas, los cuales poseen en general buena textura (francos), estructura (granular), profundidad efectiva (40-60 cm), adecuado drenaje interno, adecuada capacidad de retención de humedad y mayor resistencia

a la erosión en comparación con otros suelos de la zona cafetera.

**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 se denomina capacidad de campo; esta situación puede darse en suelos bien drenados, dos o tres días después de una lluvia. La 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 cafeto está más expuesto a deficiencias hídricas en los suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarios que en los derivados de cenizas volcánicas. Si se considera como referente, 125 mm de deficiencia de agua como un valor que afecta la producción en café, 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 a), para el café podría hablarse de una tolerancia moderada a la deficiencia de agua.

**Aireación.** Es el intercambio de oxígeno atmosférico y el suelo para ser tomado por la raíz y los microorganismos, los que a su vez liberan CO<sub>2</sub>. Una aireación restringida causa disminución del oxígeno y acumulación de CO<sub>2</sub> en el suelo, lo cual puede conducir a disminuciones en la capacidad de absorción de agua y de la toma de los nutrimentos y retraso o



inhibición de los procesos de crecimiento de la raíz. La falta de oxígeno en el suelo está generalmente asociada con altas humedades o altas temperaturas.

**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. Jaramillo y Gómez (1989) encontraron que la temperatura en los primeros 50 cm de un suelo de origen volcánico 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 general, los suelos de la zona cafetera son considerados de fertilidad natural media a baja. 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

observadas más frecuentemente son las de hierro y boro, aunque su manifestación es temporal; la primera está asociada con períodos lluviosos y la segunda con períodos secos. Los componentes abióticos son determinantes al momento de definir el sistema de producción con café a establecer en un sitio determinado.

## La planta

**Evaporación.** Es el proceso físico por el cual una masa líquida es transformada en vapor (vaporización) y removida desde la superficie evaporante (Jaramillo, 2005 b).

La mayor parte del agua que pierde la planta se evapora de las superficies foliares por el proceso de la transpiración, la cual consiste esencialmente en la evaporación del agua de las superficies celulares y su pérdida a través de las estructuras anatómicas de la planta (estomas, lenticelas, cutícula). Este proceso está bajo el control de la planta, aunque impuesto por las condiciones del medio, y representa uno de los puntos principales de interacción entre la planta y su ambiente (Loomis y Connor, 1992).

**Evapotranspiración.** Es la integración de la evaporación y la transpiración, procesos que ocurren de manera simultánea; la transpiración es necesaria para las plantas ya que estas dependen del intercambio de gases y de la incidencia energética para su nutrición. El agua perdida por transpiración debe ser reemplazada constantemente, pues esta se concibe como un sistema regulador de la temperatura de la planta, al disipar el exceso de energía y temperatura (Loomis y Connor, 1992; Jaramillo, 2005 a, b). La falta de un suministro adecuado de agua causa el cierre estomático, afectando directamente el proceso fotosintético, al reducirse la actividad enzimática involucrada en las reacciones fotosintéticas (Pimentel, 1999).

Evaluaciones de la evapotranspiración en café indican que aproximadamente un 35% corresponde a la evaporación y un 65% a la transpiración, y sitúan los valores de evapotranspiración entre 5,6 y 2,4 mm día<sup>-1</sup> (Flumignan et al., 2011). Jaramillo (2005), estimó que la evapotranspiración media en la zona cafetera colombiana entre los 1.000 y 2.000 m de altitud varía entre 3,74 y 3,06 mm día<sup>-1</sup>, respectivamente. Jiménez y Golberg (1982) indican que la evapotranspiración anual de un cultivo de café a libre exposición solar está cercana a los 1.327 mm; bajo sombrío de *Inga* sp. es de 703 mm; y de 1.052 mm en un sistema agroforestal con sombrío diverso.

## El clima

**Requerimientos hídricos.** La lluvia en Colombia está influenciada por la Zona de Confluencia Intertropical, las Ondas del Este con trayectoria a través de océano Atlántico, los huracanes, los sistemas atmosféricos de la Amazonia y los sistemas atmosféricos del océano Pacífico (Trojer, 1954, 1959; Pabón et al., 1998; Poveda, 2004). Eventos de variabilidad climática

**Cuando la planta de café está sometida a una alta deficiencia hídrica (por ejemplo, 30 a 40 días continuos sin lluvia), detiene su crecimiento, el follaje se torna 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.**

**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 ocurren condiciones físicas desfavorables como alto contenido de arcillas y alta retención de humedad, que causan mal drenaje o encharcamiento. 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.**

**Como resultado de la excesiva humedad del suelo, las raíces absorbentes se deterioran debido a la escasez de oxígeno, ocurriendo estrés, asfixia y muerte.**

como La Niña (aumento de la lluvia) y El Niño (disminución de la lluvia) también tienen un efecto sobre la intensidad de las lluvias en algunas regiones de la zona cafetera (Ramírez y Jaramillo, 2009).

En las zonas cafeteras la precipitación alcanza valores entre 2.000 y 2.500 mm. En



general, ocurren dos períodos secos y dos lluviosos en el año, con volúmenes anuales de evaporación inferiores a 1.200 mm. No obstante, existen zonas con limitaciones de agua por una inadecuada distribución de lluvias o por la alta evaporación (Jaramillo 2005 a, b). La 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 (Jaramillo, 2000).

La distribución intra-anual de la lluvia en Colombia puede ser de tipo unimodal, con un pico máximo de lluvia en el año, o bimodal con dos picos máximos de lluvia en el año. Las características de tipo unimodal se presentan en la región Oriental del país, en los Llanos Orientales, en la vertiente del Amazonas y en la región Atlántica. Patrones de distribución bimodal se presentan en la región Andina, en las cuencas de los ríos Patía, Cauca y Magdalena, para latitudes entre los 4 y 7°N. En el Nudo de Los Pastos, en la cuenca alta del río Magdalena y en la llanura del Pacífico no se observan los comportamientos anteriores y ocurre poca

variación en las cantidades de lluvia entre un mes y otro (Jaramillo y Chaves, 2000).

El consumo de agua de la planta de café está próximo a  $125 \text{ mm mes}^{-1}$ . Si el aporte hídrico constante es inferior a este valor, disminuye la producción. Si se considera que en las regiones cafeteras de Colombia la evaporación diaria alcanza entre 3 y 4 mm, un período seco de 30 a 40 días consecutivos afectaría la producción del grano (Jaramillo, 2005 a, b). Las regiones con Deficiencia Hídrica Anual (DHA) menor a 150 mm, son aptas para el cultivo del café. Si la DHA está entre 150 y 200 mm, se considera zona marginal, y allí para obtener alguna producción, se requiere de riego suplementario. Se considera que las regiones no aptas para el cultivo son aquellas donde la DHA es superior a 200 mm.

**Fotoperíodo – duración del día.** Fundamental para la inducción de la formación de botones florales o diferenciación floral. Para la floración del cafeto se requieren días cortos, con un fotoperíodo crítico de 13,5 horas de brillo solar astronómico, por lo cual, dentro del rango latitudinal de la

zona cafetera de Colombia, este factor no es limitante, por presentar durante todo el año días con un número menor de 13,0 horas de duración (Jaramillo, 2005).

**Insolación.** La insolación se expresa como el número de horas en los cuales el sol brilla en una localidad (radiación directa). El brillo solar anual en la zona cafetera colombiana oscila cantidades entre 1.600 y 1.800 horas. El brillo solar promedio para la zona cafetera está próximo a las 1.550 h año<sup>-1</sup>, lo que indica alta nubosidad diurna. En las estaciones climáticas de Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar) y El Rosario (Venecia, Antioquia) se observan valores extremos superiores a las 2.050 h año<sup>-1</sup>. El menor valor se observa en la estación Luis Bustamante (Villarica, Tolima), con 945 h año<sup>-1</sup>.

**Radiación solar.** Se define como el flujo de radiación solar por unidad de área en unidad de tiempo. La radiación solar es el principal factor que determina el microclima del cultivo; su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que la intensidad de la radiación, el grado de interceptación y la eficiencia en el uso de la energía radiante, son factores determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas. Para el proceso de la fotosíntesis, la planta usa un rango espectral de la radiación solar, comprendido entre los 400 y los 700 nanómetros (nm), denominada Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), la cual es cerca del 50% de la radiación global. El valor promedio de radiación solar para la zona cafetera colombiana es de 382 cal cm<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>. Los máximos valores se presentan en Pueblo Bello (Pueblo Bello, Cesar) con 452 cal cm<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup> y 433 cal cm<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup> en La Montaña (Dolores, Tolima). Los menores valores se registran en las estaciones Jorge Villamil

en Gigante (Huila), con 300 cal cm<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup> y en La Granja Tibacuy en Tibacuy (Cundinamarca) con 329 cal cm<sup>-2</sup>-día<sup>-1</sup>.

**Requerimientos térmicos.** El óptimo de temperatura media del aire para el cultivo del café, *Coffea arabica*, está entre 18 y 22°C y para *Coffea canephora* entre 22 y 26°C; temperaturas mayores a 23°C y períodos secos provocan aborto floral y formación de “flores estrella”, ocasionando una drástica disminución de la producción. Temperaturas menores a 18°C promueven el crecimiento vegetativo, reducción de la diferenciación floral y baja productividad.

**Temperatura del suelo.** La superficie del suelo, con o sin vegetación, es el principal receptor de la radiación solar, siendo a la vez un emisor de radiación de onda larga o calor. La temperatura del suelo presenta variaciones diurnas desde la superficie hasta 25 cm de profundidad. La cantidad y distribución de la lluvia, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y las propiedades físicas del suelo, determinan esta temperatura. La temperatura media del suelo está próxima a 24°C, correspondiendo a una temperatura media del aire de 21°C.

**Viento.** El viento es el movimiento del aire en la superficie terrestre, es generado por la acción de gradientes de presión atmosférica producidas por el calentamiento diferencial de las superficies. Las dos características fundamentales del viento son la dirección y la velocidad. En la mayoría de las localidades las ráfagas diurnas presentan mayor velocidad que las nocturnas, debido a la acción de la radiación solar. En general, las velocidades del viento registradas en la zona cafetera son bajas, inferiores a 5,0 km h<sup>-1</sup> y valores extremos de las ráfagas (impulsos cortos) próximos a 70 km h<sup>-1</sup>; aunque estos valores son de ocurrencia

esporádica, originan daños en los cultivos (plátano, maíz, árboles de sombrío) y en las construcciones (Jaramillo, 2005 a).

## Sistema de producción a libre exposición solar o en sistema agroforestal

Si las características de clima y suelo son las adecuadas para el desarrollo de la planta de café, su cultivo puede establecerse a libre exposición solar o mediante la incorporación de árboles,

que cumplen diferentes funciones dentro de los lotes o toda la finca cafetera. Si las condiciones para el desarrollo de la planta no son favorables desde el punto de vista de la oferta climática y del suelo, la mejor estrategia y donde se obtendrían los mejores resultados sería con el establecimiento de árboles como sombrío del cultivo (Figura 5).

La sombra no es universalmente benéfica y las necesidades de utilizarla están en función del clima y suelos; si se establece



**Figura 5.** Principales criterios para decidir establecer un sistema de producción de café a libre exposición solar o bajo sombrío.

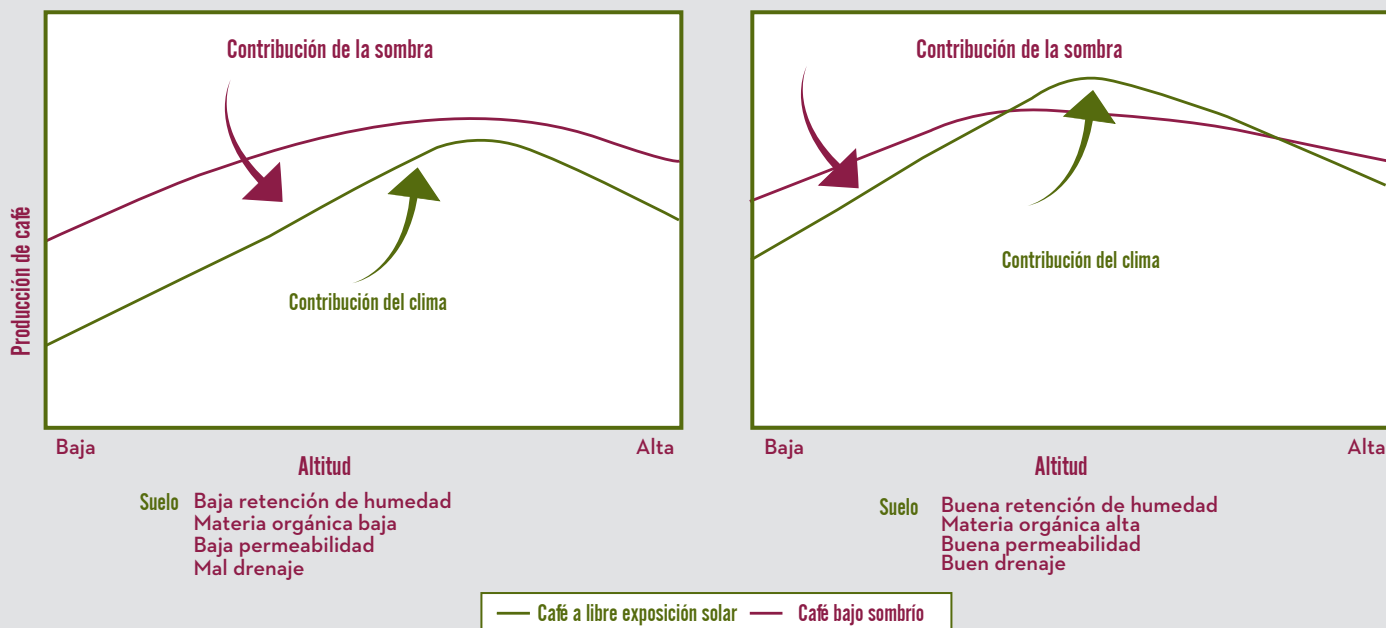
sombra al café en sitios donde no es requerida se afecta la producción, es decir, los árboles de sombra deberán ser establecidos donde, por condiciones de clima y suelos sean indispensables, como se presenta en la Figura 6 (Beer et al., 1998; Perfecto et al., 1996; Sivetz, 1971; Soto et al., 2000). Los beneficios adicionales al café como los económicos y sociales, entre otros, por sí solos, es

posible que no compensen las reducciones de la producción del café, en lugares no requeridos.

Con el propósito de contribuir a tomar mejores decisiones al momento de definir el sistema de producción con café, de acuerdo a la localidad, en la Tabla 2 se presentan criterios climáticos, sociales, económicos y ambientales que orientan sobre esta decisión.

## Recomendación práctica

El cafeto es una planta que en su ambiente original se encuentra en el sotobosque, por lo que es una planta que se adapta a la sombra; sin embargo, en los períodos lluviosos o en las regiones de alta precipitación, la radiación es baja y puede limitar la productividad del cafeto, 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 (Arcila, 2007).



**Figura 6.** Producción de café en función de la exposición solar, la altitud y el tipo de suelo (Adaptado de Beer, Muschler, Kass y Somarriba, 1998).

**Tabla 2.**

Criterios para la decisión de establecer café a libre exposición solar o bajo sombrío.

Criterios de decisión	CLE	SAF	ARB
<b>Criterios de clima y suelos</b>			
Zonas de altas temperaturas			
Lluvia anual entre 1.800 a 2.000 mm (120 mm mes <sup>-1</sup> )			
Temperatura entre 19,0 a 21,5°C			
Radiación solar de 382 cal cm <sup>-2</sup> -día <sup>-2</sup> (3,5 kWh m <sup>-2</sup> )			
Brillo solar anual entre 1.500 a 1.800 h (4,5 h día <sup>-1</sup> )			
Protección del cultivo durante períodos secos (fenómeno de El Niño)			
Protección del suelo durante períodos húmedos (fenómeno de La Niña)			
Suelos sin limitaciones hídricas en la franja ideal de altitud			
Suelos sin limitaciones nutricionales en la franja ideal de altitud			
Suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua			
Suelos susceptibles a la erosión			
Suelos poco profundos y poco estructurados			
Suelos con bajos contenidos de materia orgánica y baja fertilidad natural			
Suelos con vocación forestal			
Suelos con vocación agroforestal			
Suelos con vocación agrícola			
Zonas de altitudes elevadas			
Zona altitudinal óptima para el cultivo (1.200 a 1.800 m)			
Zonas donde se presenten daños causados por el viento			
Regiones con Deficiencia Hídrica Anual (DHA) inferior a 150 mm			
Regiones con DHA entre 150 y 200 mm			
Regiones con relieve fuertemente quebrado			
Regiones con pendientes fuertes (mayor que 50%)			
Regulación del microclima dentro de la plantación			
Aumento y mantenimiento de la materia orgánica del suelo			
<b>Criterios ambientales</b>			
Facilitar el desarrollo del sistema de producción			
Mantener y mejorar la fertilidad del suelo			
Proporcionar hábitat para las especies nativas			
Restaurar ecosistemas degradados			
Contribuir a generar agua limpia y fortalecer el ciclo hidrológico			
Protección de especies arbóreas amenazadas o en peligro de extinción			
Reducción en la perturbación del suelo <sup>1</sup>			
Control natural de arvenses y reducción en aplicación de herbicidas <sup>2</sup>			
Captación de carbono (Carbono Neutral)			
Actitud ambiental (conservación)			
<b>Criterios económicos</b>			
Producir madera y fibra de una manera sostenible			
Crear oportunidades de agregar valor a los productos agrícolas			
Desarrollar sistemas con alto potencial productivo			
Alta disponibilidad de insumos			
Baja disponibilidad de insumos			
Producción de cafés especiales			

Continúa...



...Continuación

Venta de bonos de carbono			
Obtención de beneficios económicos (frutos, resinas, fibras, etc.)			
Reducción en la aplicación de insumos (fertilizantes, herbicidas)			
Conservación de recursos naturales (biodiversidad)			
<b>Criterios sociales</b>			
Producir alimentos sin riesgos para la salud y de alto valor nutritivo			
Asegurar un ingreso digno para los productores			
Producción de leña			
Cambio en valores, comportamientos y prácticas respecto al ambiente			
Propósitos de investigación en sistemas agroforestales			

<sup>1</sup> Establecimiento de café con 5.000 sitios por hectárea y dos tallos por sitio.

<sup>2</sup> Establecimiento del café con altas densidades de siembra.

CLE: Café a libre exposición solar.

SAF: Café en asocio de árboles.

ARB: Árboles

## Factores determinantes de la productividad de un sistema de producción de café

La cantidad de café pergamino seco obtenido al término de un ciclo productivo, es el resultado de la sumatoria de diversos factores, que actúan de forma continua a través de dicho ciclo; entre estos factores pueden mencionarse la variedad cultivada, la oferta ambiental, el manejo y la edad del cultivo. Cualquier proceso de análisis para tratar de identificar la producción máxima alcanzable en una región determinada, deberá empezar por identificar la interacción de dichos factores (Farfán y Sánchez, 2016), entre los que se destacan (Scurlock et al., 1987):

**La cantidad de radiación incidente en el cultivo.** La radiación solar, como factor ambiental, es importante para los seres vivos porque

es la fuente de energía para procesos físicos y biológicos, de ella dependen los vegetales para elaborar carbohidratos mediante la fotosíntesis. La radiación, al interactuar con otros factores como la temperatura y precipitación, influye en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Así, la agricultura es una forma de cosechar la energía solar cuando se complementa con un adecuado suministro de agua, nutrimentos y dióxido de carbono (Díaz et al., 2013).

La cantidad de radiación incidente en el cultivo de café dependerá del sitio donde se establezca, el sistema de producción seleccionado (sol o sombra), la duración del período de luz, la naturaleza y el estado de desarrollo de las plantas. Estos elementos servirán incluso para rechazar el establecimiento de un cultivo en una zona, atendiendo a los valores de radiación, al esperarse producciones no rentables.

**La proporción de luz interceptada por los órganos verdes de la planta.** La interceptación

de la radiación solar por las hojas es imprescindible para la conversión de la energía solar en materia vegetal (biomasa). Al inicio del ciclo de un cultivo gran parte de la radiación no es interceptada, incidiendo sobre el suelo y no siendo aprovechada por la planta. El parámetro básico que relaciona la radiación que un cultivo intercepta y la radiación solar incidente es el Índice de Área Foliar (IAF), que cuantifica la superficie de las hojas de un cultivo por unidad de superficie del suelo (Paniagua et al., 2015). Por lo tanto, la proporción de luz interceptada por los órganos verdes de la planta está en función del tamaño y estructura del dosel, que en café está determinado por la densidad de siembra, el arreglo espacial, la variedad seleccionada y las prácticas de manejo del cultivo, entre otros.

**La eficiencia de la conversión fotosintética de la luz interceptada en biomasa.** El crecimiento de la planta es una función del equilibrio de la biomasa acumulada a través de la fotosíntesis; por lo tanto, el rendimiento del cultivo depende de las tasas de fotosíntesis en ese ambiente. El rendimiento de biomasa de una planta depende de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida a través de las hojas y la eficiencia con la que puede convertir la energía radiante en asimilados a través del proceso de fotosíntesis. La eficiencia dependerá de la sanidad del cultivo, la disponibilidad hídrica y de nutrientes (Behling et al., 2015). En el cultivo del café la eficiencia de la conversión fotosintética de la luz interceptada en biomasa, dependerá de la edad del cultivo, la nutrición de la planta (fertilización), la competencia por arvenses y la fitosanidad del cultivo.

**Las pérdidas respiratorias de la biomasa vegetal.** La respiración de las plantas es el conjunto de reacciones por medio de las cuales los carbohidratos sintetizados por medio de la fotosíntesis, son oxidados a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , y la energía liberada es transformada en Trifosfato de adenosina (ATP); los carbohidratos son los principales sustratos respiratorios de las plantas. La energía obtenida a través de la respiración y almacenada en forma de ATP, es utilizada para el crecimiento de los órganos vegetales, el mantenimiento de las estructuras existentes, el transporte de metabolitos e iones, y la generación de compuestos de carbono intermedios (Mosquera et al., 1999). La tasa respiratoria en cultivos de café puede verse afectada por la disponibilidad de luz (radiación solar), la humedad relativa dentro del cultivo, la humedad del suelo, la temperatura, etc.

## Sistema de producción de café, productivo y rentable

La productividad del cafetal definida como kilogramos de café pergamino seco (kg c.p.s.) obtenidos por unidad de recurso utilizado en su producción, depende de la cantidad de efectos positivos que produzcan en la planta los diferentes factores ambientales y las prácticas de manejo. La productividad y rentabilidad se alcanzan si, integradamente, se aplican las siguientes prácticas (Cenicafé, 2018):

- ♦ Sembrar variedades mejoradas con resistencia durable a la roya del cafeto.
- ♦ Sembrar o renovar los cultivos en las épocas correctas y utilizar colinos de café de origen conocido.



- ◆ Establecer la densidad de siembra óptima y definir los ciclos de renovación para mantener los cultivos jóvenes.
- ◆ Manejar la luminosidad del cultivo.
- ◆ Nutrir apropiadamente las plantas.
- ◆ Mejorar la acidez del suelo, ajustado para el cultivo del café.

**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 (Arcila, 2007).**

- ♦ Realizar un oportuno control fitosanitario.
- ♦ Manejar oportunamente las arvenses.

La interacción de este conjunto de factores y opciones tecnológicas constituye lo que se denomina 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 (Arcila, 2007).