

Densidad de siembra y productividad de los cafetales

Jaime arcila Pulgarín.



Consideraciones sobre el fenómeno de la competencia entre plantas

El fenómeno de competencia en las plantas

La competencia en las plantas puede mirarse como “las inconveniencias causadas por la proximidad de los vecinos”. Éstas pueden deberse a la disminución en la disponibilidad de luz, agua o nutrimentos para cualquier planta individual, cuando su fronda o el área radical se traslapa con la de otro individuo. Por consiguiente, el grado de aglomeración en un área tiene un efecto importante en la cantidad de traslape entre los individuos y en el crecimiento promedio de estos (Park *et al.*, 2003).

Definición de competencia: “Interacción mutuamente perjudicial entre dos o más individuos que tratan de adquirir al mismo tiempo un recurso común y limitado”

La competencia puede ocurrir dentro de la misma especie (intraespecífica) o entre individuos de diferentes especies (interespecífica). Es altamente dependiente de la densidad. Diferencias en la forma de crecimiento como: organización del tallo y ramificaciones, forma de las hojas, tasa de desarrollo, patrón diario de toma de agua y nutrimentos del suelo y la actividad fotosintética, influyen en la magnitud de la competencia (Azam-Ali y Squire, 2002).

Efectos de la competencia sobre la biomasa vegetal

A nivel de germinadores o estado de plántulas, una alta densidad por área no tendrá un efecto inicial sobre los individuos. A medida que las plantas se desarrollan llegará el momento en que se intensificará la competencia, para las raíces y la fronda, por espacio, nutrimentos, agua y luz.

En la competencia intraespecífica (monocultivo) pueden identificarse tres efectos principales: 1) Un efecto de competencia - densidad (disminución del tamaño promedio de las plantas a medida que se incrementa la densidad; 2) Una alteración en el tamaño de la estructura de la población (desarrollo de una jerarquía por tamaños) es decir, unos pocos individuos aventajan a los otros y crecerán más rápido mientras que otros tendrán menos aptitud para competir y su crecimiento se retardará; 3) Una mortalidad dependiente de la densidad (autoraleo). El resultado final será entonces el “aclareo” o auto raleo y el desarrollo de una jerarquía de tamaños, con unos pocos individuos muy grandes y muchos individuos pequeños (Harper, 1977; Park *et al.*, 2003).

La prontitud con que se manifiestan estos efectos sobre el peso y el tamaño de las plantas depende de la densidad inicial. Si ésta es alta, los efectos aparecerán más temprano. Independientemente de la densidad inicial, las poblaciones convergirán hacia una densidad común, la cual disminuirá con el transcurso del tiempo.

En los sistemas de producción de café se presentan simultáneamente los dos tipos de competencia. Por ejemplo, en un cultivo al sol durante los tres primeros años de desarrollo, en un sistema de café intercalado (ej. café, maíz y arvenses) o en un sistema de café bajo sombra (ej. café y guamo), ocurre competencia interespecífica; mientras que en un monocultivo de café al sol mayor de tres años, predomina la competencia intraespecífica.

Si se hace una comparación y contraste entre los dos tipos de competencia intraespecífica e interespecífica, se encuentra que los mecanismos básicos de explotación e interferencia son similares, pero la competencia interespecífica difiere en tres aspectos:

1. Los individuos de especies diferentes no usan los mismos recursos.
2. Los individuos de especies diferentes no usan los recursos exactamente en la misma forma.
3. La competencia interespecífica es asimétrica, es decir, no afecta a las especies involucradas de la misma forma.

La densidad de siembra: una estrategia para el manejo de la competencia

La densidad de siembra se define como el número de plantas por unidad de área de terreno. Tiene un marcado efecto sobre la producción del cultivo y se considera como un insumo, de la misma forma que se considera por ejemplo, un fertilizante.

La densidad de siembra está relacionada con los efectos que produce en la planta la competencia de otras plantas de la misma o de otra especie, y además, con una mayor o menor eficiencia de captación de la radiación solar (Fageria, 1992).

Las plantas responden a las altas densidades de siembra de varias formas: aumento de la altura y la longitud de los entrenudos, y reducción del número de ramas, nudos, hojas, flores y frutos (Willey, 1994).

Entre los factores más importantes que determinan la densidad de siembra óptima para un cultivo se encuentran: la longitud del período de crecimiento,

las características de la planta, el nivel de recursos disponible para el crecimiento y el arreglo espacial (Willey, 1994).

Longitud del período de crecimiento. Las plantas que tienen un período de crecimiento muy corto, tienen menos tiempo para alcanzar un tamaño suficiente para utilizar completamente los recursos, por consiguiente se necesitan muchas plantas para alcanzar la máxima producción por unidad de área.

En cultivos cuyo producto comercial es la parte vegetativa (“cultivos vegetativos”) (repollo, lechuga) son necesarias mayores densidades para las siembras tardías o situaciones de cosecha temprana.

En cultivos cuyo producto comercial es la parte reproductiva (“cultivos reproductivos”) (maíz, algodón), debido a que una determinada variedad tiene un período crítico para maduración, requieren densidades más altas para los cultivares de maduración temprana.

Características de la planta. Dentro de un cultivo específico, mientras más se despliegue la planta individualmente para interceptar la radiación, menor será la densidad de población. En las legumbres de grano por ejemplo, los tipos extendidos, ramificados o trepadores tienen menores densidades óptimas de población, aunque esto también se asocia al hecho de que estas variedades también tienen períodos de crecimiento más largos. En los cereales, muchos de los cultivares modernos que además tienen vástagos y hojas erectas, requieren mayores densidades de población que las variedades convencionales, que no poseen estas características. Estas variedades de cereales, también ilustran la probable necesidad de mayores poblaciones para las variedades enanas ya que las plantas de porte más bajo frecuentemente tienen menor capacidad de alcanzar en forma temprana una buena cobertura del terreno. A su vez, el porte bajo puede estar asociado con la longitud del período de crecimiento, al presentar en algunos casos maduración temprana (Willey, 1994).

Nivel de los recursos disponibles para el crecimiento. En cultivos de producción reproductiva que tienen un óptimo de población más o menos crítico (por ejemplo, aquellos en los que la curva de respuesta tiene un punto de inflexión relativamente agudo), el óptimo de población se ha observado que frecuentemente es más alto a mayor disponibilidad de recursos. La misma tendencia se ha observado para el suministro de agua, aunque con frecuencia se ha sugerido que en condiciones de estrés hídrico moderado pueden ser necesarias densidades de población un poco más altas para estimular el crecimiento radical a mayores profundidades (Willey, 1994; Da Matta, 2004).

Arreglo espacial. Un aspecto integral de la densidad de población es el arreglo espacial, es decir, el patrón de distribución de las plantas sobre el terreno. Dentro de unos límites razonables, el arreglo espacial tiene menos efecto en la producción que el número de plantas.

En muchos cultivos, particularmente aquellos en los cuales las plantas individuales son grandes, por ejemplo el cafeto, el número de plantas y el arreglo espacial pueden controlarse en forma muy precisa. En otros cultivos, el control se hace mediante el peso inicial o número de semillas sembradas (tasa de semilla) lo cual es menos preciso.

Cuando el arreglo espacial difiere del ideal lo suficiente como para que se reduzca la producción, el óptimo de población generalmente es más bajo.

■ Curvas de respuesta de los cultivos a la densidad de siembra

A medida que aumenta la población disminuye la producción media por planta, debido a un incremento de la competencia por los recursos necesarios para el crecimiento (Willey y Heath, 1969).

Sobre la base de área, sin embargo, incrementar el número de plantas permite una mayor utilización de los recursos y como consecuencia, la producción biológica total aumenta en la forma de una curva de rendimientos decrecientes que se nivela cuando la población de plantas es lo suficientemente alta para la máxima utilización de los recursos, y a partir de este punto con un aumento adicional de la densidad de población, la producción total por unidad de área permanece generalmente constante (Willey y Heat, 1969).

Se han propuesto muchas ecuaciones para describir cuantitativamente las curvas de respuesta a la densidad de población. Estas expresiones ayudan a entender las interrelaciones biológicas involucradas y a determinar en forma general, la población óptima y la máxima producción para una curva determinada (Willey y Heat, 1969).

La producción del cultivo generalmente involucra ciertas partes de la planta y se ha sugerido que la naturaleza de la curva de respuesta a la densidad depende de si la parte cosechada es vegetativa (hojas, tallos, raíces) o si éstas son reproductivas (frutos, semillas) (Figura 6.1) (Willey, 1994).

Para la “producción vegetativa”, la curva de respuesta sigue el patrón para la producción total descrito anteriormente (rendimientos decrecientes) (Figura 6.1A); mientras que para la “producción reproductiva”, la curva de respuesta alcanza un valor máximo y luego disminuye con el subsiguiente aumento de la población, es decir, hay un punto de inversión (Figura 6.1B).

Estas curvas se conocen normalmente como asintóticas y parabólicas, pero estos términos no significan una descripción matemática totalmente precisa.

En las “producciones reproductivas”, el punto de inversión tiende a ser más crítico, por ejemplo, la producción cae más rápidamente a ambos lados del óptimo, cuando la planta individual es relativamente inflexible y no puede adaptarse fácilmente a los cambios del área que ocupa.

En términos biológicos, la población óptima para una curva asintótica puede definirse como la población

mínima de plantas con la cual se alcanza la máxima producción. Para la curva parabólica, es simplemente la población de plantas en el punto de inversión. En la práctica, cada curva tiene un óptimo económico un poco abajo del óptimo biológico y el punto exacto depende de los valores relativos de la semilla, la planta o la producción final.

Para la curva de respuesta asintótica, las ecuaciones más ampliamente aceptadas son aquellas basadas en una relación lineal entre el recíproco de la producción por planta y la población de plantas. Willey y Heat (1969), Willey (1994) y Park *et al.*, (2003), han propuesto otras ecuaciones, pero todas encajan dentro de la siguiente ecuación general:

$$1/w = a + bx$$

En donde:

$1/w$ = producción por planta
 x = población de plantas
 a y b = constantes

Una desventaja teórica de esta ecuación es que describe una curva de respuesta de la población de plantas para la producción por unidad de área que no es constante a densidades altas pero que es verdaderamente asintótica, por ejemplo, la producción alcanza un valor máximo (la asíntota) que se consigue solamente con una población infinita de plantas. No obstante, en la práctica, repetidamente se obtiene un buen ajuste para un amplio rango de cultivos vegetativos (Willey,1994).

También se ha sugerido que la constante “a” puede dar una medida del potencial genético, puesto que $1/a$ representa la aparente producción máxima por planta con una población cero (en la práctica, $1/a$ alcanza el máximo valor una vez la población de plantas es lo suficientemente baja para que no haya competencia).

En forma similar “b” puede dar una medida del potencial ambiental porque la asíntota de la producción por unidad de área es igual a $1/b$.

Estas sugerencias pueden ser útiles cuando se están comparando diferentes genotipos en un ambiente determinado o diferentes ambientes con un genotipo determinado. Sin embargo, no se puede asumir que diferentes genotipos o ambientes tienen valores constantes de “a” y “b”, respectivamente, puesto que $1/a$ no puede ser completamente independiente del ambiente y $1/b$ no puede ser independiente del potencial genético (Willey,1994).

Para las curvas de respuesta de tipo parabólico, el recíproco de la producción por planta da una relación

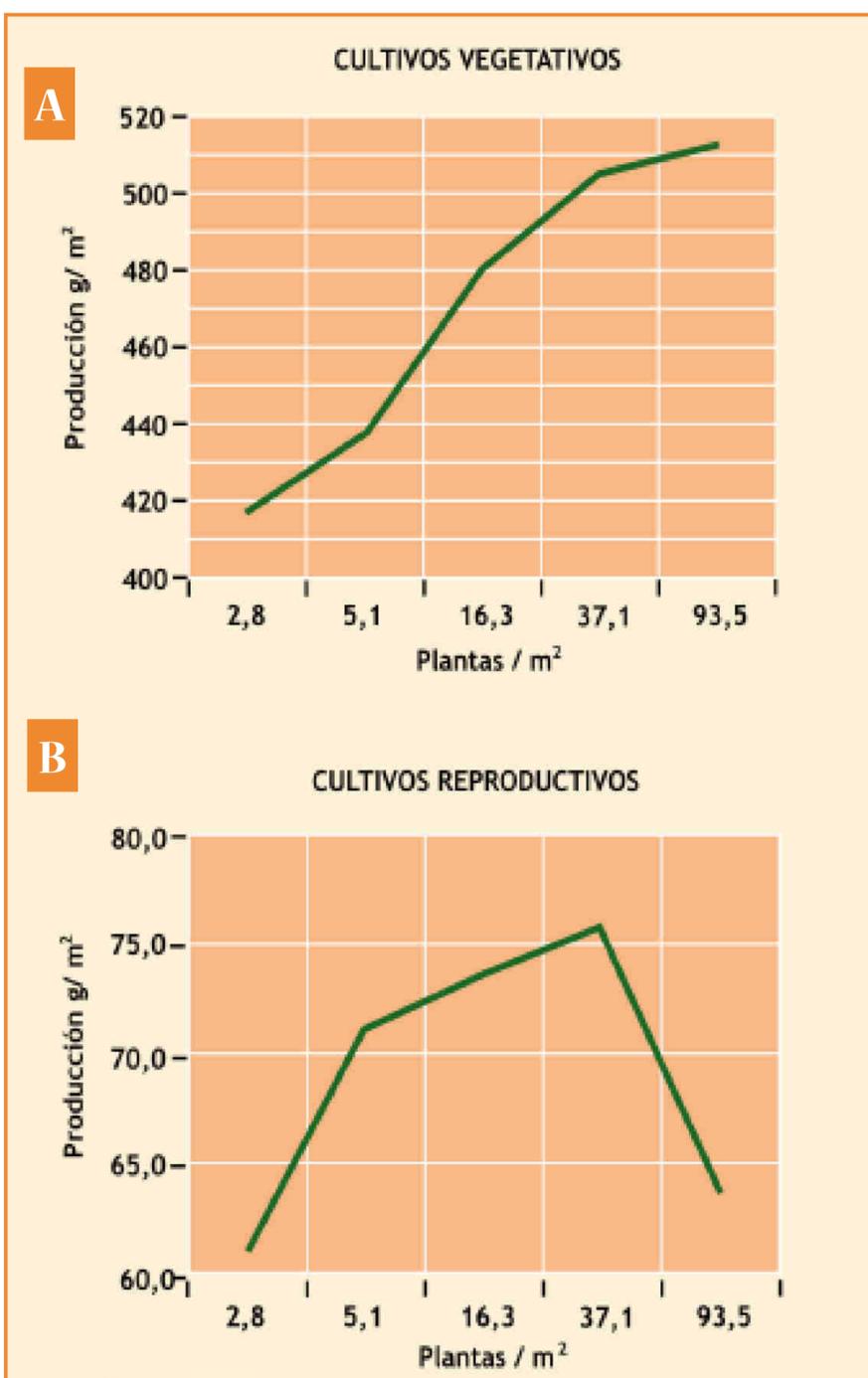


Figura 6.1. Curvas de respuesta de producción para cultivos vegetativos (A) (asintótica) y reproductivos (B) (parabólica) (Willey, 1994).

curvilínea con la población de plantas, la cual puede ajustarse mediante una ecuación cuadrática:

$$1/w = a + bx + cx^2$$

Esta ecuación es una extensión puramente empírica de la situación asintótica, pero que con frecuencia da un buen ajuste.

Para ajustar una relación cuantitativa en la práctica, se requieren valores de producción del cultivo para un rango de densidades de población. Teóricamente, si se va a ejecutar una regresión lineal solamente se requieren dos poblaciones; en la práctica, un mínimo de cuatro son aconsejables, y éstas deben ser lo suficientemente espaciadas.

Para ajustar la ecuación resumida arriba, se calcula el recíproco de la producción por planta y se hace el correspondiente análisis de regresión, por ejemplo, una regresión lineal para una curva asintótica y una regresión cuadrática para la parabólica (Willey,1994).

Finalmente, para obtener la curva de respuesta ajustada de la población, los valores ajustados de la regresión del recíproco de la producción por planta se reconvierten a valores de producción por unidad de área. Con frecuencia, una gráfica dará con suficiente precisión el óptimo de población y la máxima producción alcanzada, pero éstas pueden calcularse exactamente como:

Ecuación	Población óptima	Máxima producción
$1/w = a + bx$	Infinita	$1/b$
$1/w = a + bx + cx^2$	$\sqrt{a/c}$	$1/(\sqrt{a/c} + b)$

Densidad de siembra óptima para cafetales

Diferentes experimentos en café han permitido establecer las siguientes ecuaciones para representar la respuesta a la densidad de siembra, en Colombia (Duque, 2004):

$$Y=130,73 + 0,052647 X - 0,000002359 X^2$$

en donde:

Y= Producción en @ de cps/ha
X= número plantas por hectárea

Esta función describe la respuesta en productividad en arrobas de café pergamino seco por hectárea (@cps/ha)

para un cultivo de variedad Caturra, a plena exposición solar y durante un ciclo de 5 años.

Esta función es de tipo cuadrático y se caracteriza por ser marginal decreciente, lo cual implica que al aumentar la densidad de siembra a partir de 2.500 árboles por hectárea hasta un poco más de 10.000, la productividad se incrementa pero en forma decreciente, para luego comenzar a disminuir (Figura 6.2).

Con base en esta función de respuesta es posible estimar el óptimo biológico así como el óptimo económico para la variable densidad de siembra, con los siguientes resultados:

Óptimo biológico: 11.033 plantas/ha
Óptimo económico: 9.404 - 9.852 plantas/ha

Factores que afectan la respuesta del cafeto a la densidad de siembra

La respuesta del cafeto a la densidad de siembra depende de varios factores como: la variedad, el desarrollo foliar, el sistema de cultivo al sol o a la sombra, la localidad y la altitud, entre otros (Browning y Fisher, 1976, Uribe y Mestre, 1980,1988; Cannell,1985; Bartholo,1998; Rena *et al.*, 1998; Gallo *et al.*, 1999; Androcioli, 2002).

Densidad de siembra según la variedad. La densidad de siembra óptima es diferente según la variedad de café. La respuesta está condicionada al porte alto o bajo de la variedad y a la condición del grado de exposición solar del cultivo (Mestre y Salazar, 1990).

A menor expansión de la planta individual, mayor será el óptimo de población y viceversa. Las variedades de porte bajo cultivadas en Colombia tienen menor expansión individual que las variedades de porte alto.

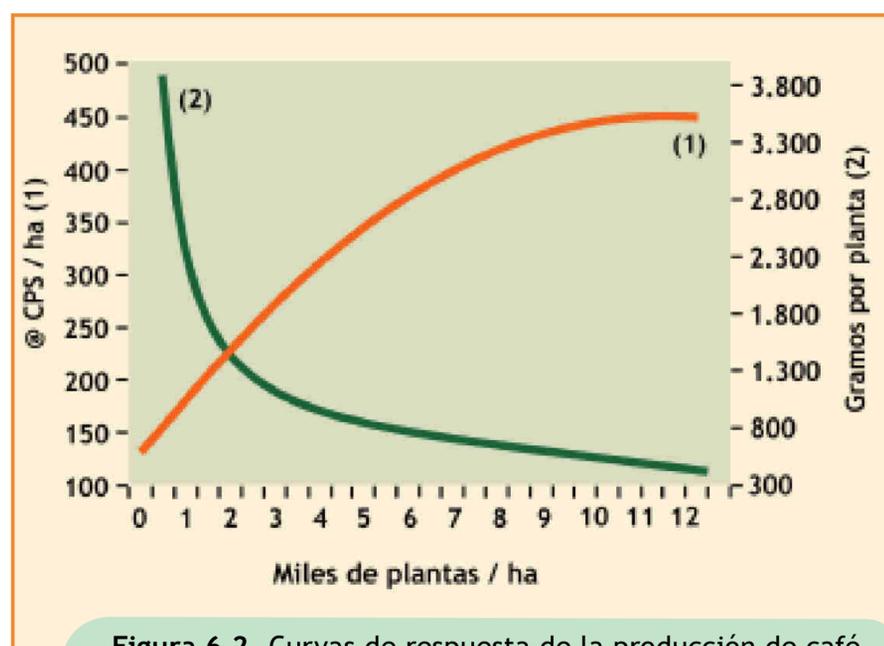


Figura 6.2. Curvas de respuesta de la producción de café a la densidad de siembra (1 @= 12,5 kg) (Duque, 2004).

Bajo condiciones de sombra, las plantas de ambos grupos tienden a presentar mayor extensión en relación con las plantas a plena exposición solar.

Por las razones expuestas, las variedades de porte bajo como la Variedad Castillo® y la variedad Caturra, son aptas para la siembra en altas densidades mientras que las variedades de porte alto como Típica, Borbón, Maragogipe o Tabi requieren bajas densidades de siembra. A su vez, estas densidades serán menores para los dos grupos de variedades, cuando los cultivos se desarrollen bajo sombra (Tabla 6.1).

Densidad de siembra óptima según el sistema de cultivo

Variedades de porte bajo a plena exposición solar y libre crecimiento. Las variedades de porte bajo que se cultivan en Colombia son la variedad Caturra, la Variedad Castillo® y las Variedades Castillo® regionales. Las investigaciones han demostrado que en cafetales a plena exposición solar y bajo condiciones ambientales y manejo agronómico adecuados, la densidad de siembra óptima tanto para la variedad Caturra como la Castillo® está alrededor de 9.500 plantas por hectárea. Aunque todavía no se tiene información experimental sobre la densidad de siembra óptima para las Variedades Castillo® regionales, puede adoptarse inicialmente el mismo óptimo que para las Variedades Castillo® y la variedad Caturra (Uribe y Mestre, 1980; Duque, 2004).

Variedades de porte bajo con sombrío. No se tiene información experimental acerca de la densidad de siembra óptima para las variedades de porte bajo con sombrío. Este óptimo dependerá de la cantidad de sombra a que esté sometido el cultivo. A su vez la

cantidad de sombra está ligada a la especie utilizada y a su edad. Para sistemas de producción con densidades de árboles de sombrío entre 70 y 100 árboles por hectárea, podría considerarse hasta un máximo de 5.000 cafetos de porte bajo por hectárea.

Variedades de porte alto a plena exposición solar y libre crecimiento. En Cenicafé se estudió la respuesta a la densidad de siembra de la variedad Borbón a plena exposición solar y libre crecimiento. La distancia entre surcos varió entre 1,5; 2,25 y 3,0 m y la distancia entre plantas entre 1,0; 1,5 y 2,0 m, para densidades de 1.666; 2.222; 2.923; 3.333; 4.444 y 6.000 plantas/ha. Se encontró una tendencia lineal en el incremento de la producción a medida que aumenta la densidad de siembra (Salazar y Mestre, 1977).

Variedades de porte alto con sombrío. No se tiene información experimental acerca de la densidad de siembra óptima para las variedades de porte alto con sombrío. Este óptimo dependerá de la cantidad de sombra a que esté sometido el cultivo. A su vez, la cantidad de sombra está ligada a la especie utilizada y a su edad. Debe considerarse además que bajo sombra la producción de café se reduce. Para sistemas de producción con densidades de árboles de sombrío entre 70-100 árboles por hectárea, podrían considerarse hasta 2.500 cafetos de porte alto por hectárea.

Es relevante anotar que la primera investigación que se realizó en Colombia sobre población de cafetos de porte alto y sombrío fue publicado por Triana (1957), y se denominó “Informe preliminar sobre un estudio de modalidades del cultivo del cafeto”. En este trabajo se evaluó la relación entre el número de plantas por hoyo (1 y 4) y la respuesta en producción al sol y a la sombra,

Tabla 6.1. Densidad de siembra y producción de las variedades de café sembradas en Colombia (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2004).

VARIEDAD	Densidad de siembra (plantas/ha)		Producción media (cps)			
			Kilogramos por árbol		Arrobas por hectárea*	
	Sombra	Sol	Sombra	Sol	Sombra	Sol
Típica	1.500	2.500	0,6	0,9	72	180
Borbón	1.500	2.500	0,8	1,2	96	240
Tabi	1.500	2.500	0,7	1,0	84	200
Caturra	Hasta 5.000	Hasta 10.000	0,35	0,5	85-140	200-300
Variedad Castillo®	Hasta 5.000	Hasta 10.000	0,35	0,6	200	220-350

* 1@=12,5 kg

para las variedades Típica y Borbón. Los resultados en producción fueron mejores para la variedad Borbón en la condición de 4 plantas por hoyo, al sol.

Interacción de la densidad de siembra y la fertilización.

La fertilización de cafetales con altas densidades de siembra debe partir de la base del análisis de suelos y considerando además que, en nuestras condiciones, la mayor respuesta obtenida ha sido a la fertilización nitrogenada y potásica (Uribe y Mestre, 1976).

Un experimento con la variedad Caturra en las densidades de siembra de 2.000, 2.500 y 3.333 plantas/ha, a plena exposición solar, con distintas dosis de fertilizante (12-12-17-2) de 0; 800; 1.600 y 2.400 kg.ha⁻¹, durante 6 cosechas, mostró que no hubo efecto significativo del fertilizante sobre la primera cosecha. Para las demás cosechas se encontró una respuesta de tipo cuadrático al fertilizante, pero no fue significativa la interacción densidad de siembra por dosis de fertilizante. Se registró para todas las densidades estudiadas, que las mayores producciones se obtienen con 1.800 kg de fertilizante por hectárea, de tal forma que la cantidad óptima por planta depende entonces de la distancia de siembra (Mestre, 1977).

En otra investigación, Uribe y Salazar (1981), estudiaron el efecto de cuatro distancias de siembra y cuatro dosis de fertilizante químico sobre la producción de café de la variedad Caturra, en siete lugares de la zona cafetera colombiana, con el fin de encontrar la mejor dosis de fertilizante para el café en relación con la densidad de población y en plantaciones sembradas a libre exposición solar. Se compararon 16 tratamientos compuestos por las distancias de siembra 1,25 x 1,25; 1,50 x 1,50; 1,75 x 1,75 y 2,00 x 2,00 metros, con 6.410; 4.444; 3.268 y 2.500 plantas por hectárea, respectivamente, y 200, 400, 600 y 800 gramos de fertilizante (12-12-17-2) por planta, repartidos en cuatro aplicaciones por año. Los resultados fueron muy similares para todos los lugares experimentales estudiados y las conclusiones son aplicables para todos.

Los análisis estadísticos demostraron que hubo incrementos en la producción de café de acuerdo con el acortamiento de las distancias de siembra. Estos resultados fueron constantes para todos los lugares, en todas las cosechas anuales y para el acumulado de las cosechas de cada sitio experimental. Se confirmaron así los resultados de otras investigaciones realizadas en la zona cafetera colombiana sobre las densidades de siembra en café.

En todas las distancias de siembra se presentaron incrementos de la producción con los aumentos en las dosis de fertilizante para todos los sitios en estudio. Esta respuesta no fue absoluta como en el caso de

las distancias de siembra, dado que en tres de los lugares experimentales no hubo respuesta estadística a las dosis de fertilizante aplicado, en algunas de las cosechas anuales. Estadísticamente no hubo interacción entre los factores dosis por distancias, pero un estudio detenido de los datos indicó incrementos muy reducidos en producción para las dosis más altas, por lo que se recomienda la aplicación de 2.500 kg de fertilizante (12-12-17-2)/ha/año para las distancias de 1,25 x 1,25 y 1,50 x 1,50 metros, y 2.000 kg/ha/año para las distancias de 1,75 x 1,75 y 2,00 x 2,00 metros. Las dosis por planta deben calcularse de acuerdo a la densidad de siembra.

Según Uribe y Salazar (1981), si se tienen distancias mayores de 2,00 x 2,00 m, la fertilización puede recomendarse por árbol sin variar la cantidad de fertilizante; en cambio cuando las distancias son más cortas, hasta el punto de establecerse una competencia entre plantas, las cantidades deben variar en el sentido de disminuir la dosis por árbol.

Densidad de siembra óptima según localidad. Cada sitio tiene una oferta ambiental (suelo y clima) que determina un potencial de producción específico y el objetivo de la densidad de siembra óptima es contribuir a la mayor eficiencia en la utilización de los recursos disponibles para ese sitio. En la Figura 6.3 se observa que aunque en todos los sitios hay un incremento en la producción al aumento en la densidad de siembra, la magnitud de la respuesta no es igual en todos los lugares, debido posiblemente a la presencia de otros factores limitantes. Además de las condiciones anotadas también deben considerarse la altitud y la latitud.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS. Es frecuente la pregunta sobre la relación entre la densidad de siembra del cafeto y la altitud. En las zonas altas debido a una menor disponibilidad de energía térmica, el desarrollo del cafeto es más lento y por tanto, no habría problema al utilizar los óptimos de densidad. En las zonas bajas hay una mayor disponibilidad de energía y el desarrollo del cultivo a plena exposición solar es más acelerado y menos eficiente y por tanto, la densidad de siembra óptima puede ser inferior a la considerada anteriormente.

Con relación a la latitud, los problemas más limitantes están relacionados con una disponibilidad hídrica muy baja durante unos períodos del año relativamente largos. De acuerdo con las mediciones de los componentes hidrológicos dentro de los cafetales, en estas regiones con períodos secos muy prolongados no son convenientes las densidades de siembra altas tanto para el café como para el sombrío, ya que se aumenta la cantidad de agua interceptada por la parte aérea de las plantas, y disminuye así la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo.

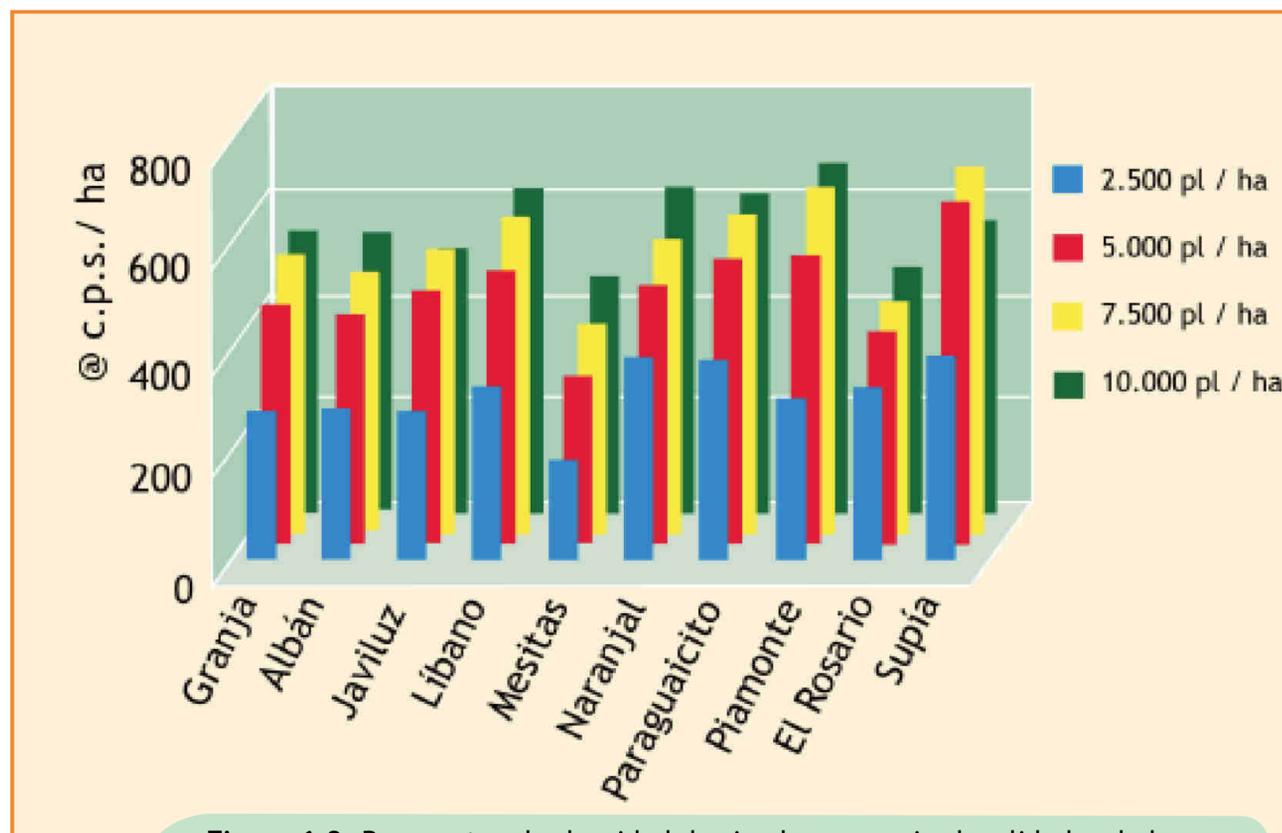


Figura 6.3. Respuesta a la densidad de siembra en varias localidades de la zona cafetera colombiana. (pl/ha=plantas/hectárea)(Mestre, 1995).

Arreglos espaciales en los cafetales

Desde el punto de vista fisiológico de la eficiencia de la interceptación de la radiación solar, el arreglo espacial ideal es la equidistancia entre determinada parte de la planta y sus vecinos inmediatos. Sobre una base de área, esto permite la utilización más eficiente de los recursos y alcanzar las máximas producciones. Este arreglo es muy usado en cultivos perennes (Willey, 1994).

En cultivos anuales es más frecuente cultivar en surcos, siendo la distancia entre surcos mayor que la distancia entre las plantas en el surco. Este arreglo espacial se define en términos de su rectangularidad, la cual indica la forma del área que es asignada a una planta individual; por ejemplo, si la distancia entre surcos es dos veces la distancia de las plantas dentro del surco, se dice que la rectangularidad es de 2:1.

Cuando las plantas se distribuyen irregularmente, la eficiencia en la utilización del área total se reduce y en consecuencia, la producción de las plantas individuales también es irregular y menor. Mientras más irregular sea el espaciamiento menor será la proporción de plantas individuales en producción dentro de los límites deseables.

Interceptación de la radiación solar por el cafeto

La radiación solar juega un papel crítico en el desarrollo de los cultivos y en consecuencia, para lograr altos rendimientos y obtener mayor productividad de los

cafetales, es necesario sembrar un número óptimo de plantas por hectárea, tener un adecuado desarrollo foliar por planta y una distribución espacial apropiada en el campo, para optimizar la interceptación de esa radiación solar.

Para la producción de materia seca, las hojas del cultivo deben interceptar radiación solar (captura de recurso) y absorber CO_2 (conversión de recurso). El tamaño y la duración del follaje determinan la tasa y la duración de la acumulación de materia seca. El tamaño de la superficie de interceptación depende del índice de área foliar del cultivo, el cual puede expresarse como el producto del número de plantas por unidad de área de terreno, del número de hojas por planta y del área promedio de las hojas por planta.

La cantidad de radiación que penetra la fronda de la planta y alcanza el suelo depende del índice de área foliar (IAF) y del ángulo de inserción de las hojas.

Para describir el patrón de penetración de la luz a través de la fronda es conveniente imaginar el cultivo como si estuviera compuesto por un número de capas horizontales, cada una con un IAF equivalente a 1 (Figura 6.4). Si se mide la radiación incidente desde la capa de la superficie superior y a un número de niveles a lo largo del perfil de la planta, correspondiendo cada nivel a la unidad de IAF, entonces, la irradiancia medida a cualquier nivel es una función del arreglo angular de las hojas por encima de ese nivel. La extinción de la luz hacia abajo, en el perfil de la planta, en plantaciones con follaje cerrado (continuo) se describe generalmente mediante la ecuación de Monsi-Saeki, citado por Saeki (1993) (Figura 6.4A):

$$I/I_0 = e^{-kL} \quad \text{donde}$$

- I_0 = La radiación incidente sobre la parte superior de la fronda
- I = La radiación a un nivel dentro de la fronda, bajo un nivel de IAF
- k = Coeficiente de extinción para la radiación
- L = Índice de área foliar

En las poblaciones cuya fronda no es cerrada, Jackson y Palmer (1979) proponen un modelo en el cual se utilizan los registros de RFA transmitida a través del dosel (T_c) y de la RFA que pasa directamente al suelo (T_f), así (Figura 6.4B):

$$T = T_f + (1-T_f) e^{-k(\text{IAF})'}$$

en donde:

- T = Transmisividad total
- T_f = Flujo de RFA transmitida directamente al suelo, entre los árboles
- $1-T_f$ = Radiación transmitida a través del dosel = T_c
- IAF = Índice de área foliar
- $(\text{IAF})'$ = $\text{IAF}/(1-T_f)$

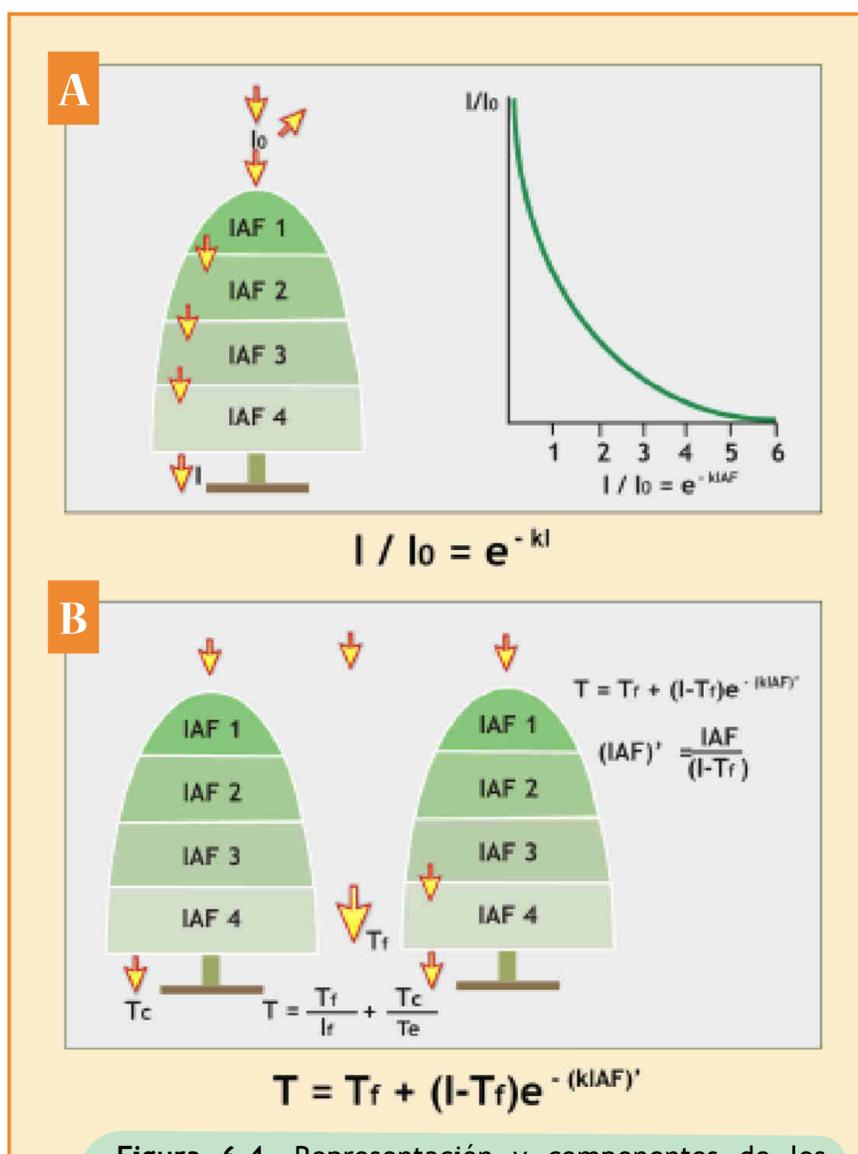


Figura 6.4. Representación y componentes de los modelos para el cálculo de los coeficientes de extinción en plantaciones con follaje cerrado A) (Monsi-Saeki, citado por Saeki 1993), y plantaciones con follajes discontinuos; B) (Jackson y Palmer, 1979).

Los patrones de interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y su relación con el desarrollo foliar fueron estudiados en poblaciones de *Coffea arabica* L. var. Colombia, de 36 meses de edad, en la Estación Central Naranjal de Cenicafé en Chinchiná, Colombia (Castillo *et al.*, 1997). Las poblaciones correspondieron a cinco densidades de siembra (2.500, 5.000, 7.500, 10.000 y 12.500 plantas/ha) y a dos disposiciones de las plantas en el terreno (cuadro y rectángulo). Se realizaron evaluaciones del área foliar, índice de área foliar e interceptación de la RFA y se aplicaron dos modelos de interceptación para determinar los coeficientes de extinción de la RFA en las diferentes densidades.

La disposición de las plantas, en cuadro o en rectángulo, no afectó significativamente el área foliar (AF) y el índice de área foliar (IAF). El AF por planta disminuyó con el incremento en la densidad de población, en tanto que el IAF y la interceptación de la radiación solar por parcela se incrementaron mostrando una respuesta cuadrática. Para esta edad del cultivo (36 meses), el valor máximo de IAF fue de 6,1, el cual se alcanzó con 12.500 plantas/ha, mientras que la interceptación máxima fue de 97% y se logró con una densidad de 10.000 plantas/ha (Figuras 6.5 y 6.6).

La interceptación de la RFA a través del perfil de la planta individual no varió por efecto de la densidad ni de la disposición de las plantas; el estrato superior interceptó alrededor del 70% de la RFA disponible. Los coeficientes de extinción fueron determinados con buen ajuste mediante los modelos de Monsi y Saeki, citado por Saeki (1993) y de Jackson y Palmer (1979), para las poblaciones con dosel cerrado y sin esta condición, respectivamente. Los valores de k variaron en un rango de 0,41 a 0,60 bajo condiciones de RFA difusa y de 0,51 a 0,72 para la RFA directa.

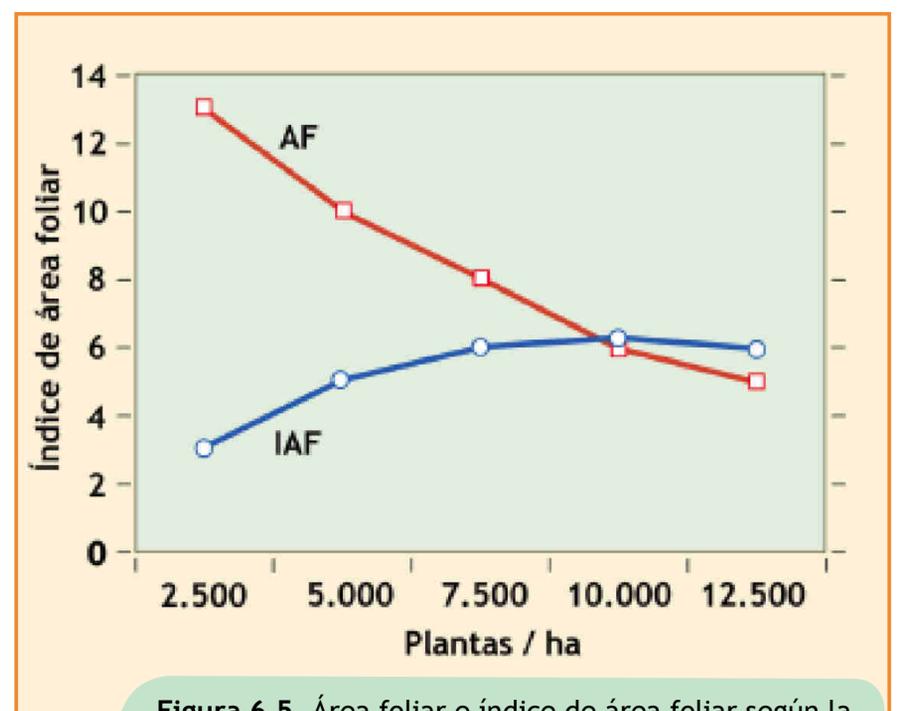


Figura 6.5. Área foliar e índice de área foliar según la densidad de siembra, en variedad Colombia (Castillo *et al.*, 1997).

El efecto de la disposición de las plantas en el terreno sobre la interceptación se presentó únicamente en la densidad de siembra de 2.500 plantas/ha, en donde la población con plantas dispuestas en rectángulo interceptó un porcentaje de RFA significativamente mayor que aquella con disposición en cuadro (Figura 6.6). Sin embargo, desde el punto de vista de manejo del cultivo esta densidad de siembra, en cualquiera de las dos disposiciones, no sería recomendable por la baja utilización del terreno evidenciado en los bajos valores de IAF (3,1 y 3,3), además de la alta proporción de pérdida de RFA (alrededor del 30%). En las demás densidades se pierde el efecto de la disposición, debido al cierre progresivo de la fronda. En las dos disposiciones, la interceptación se incrementó en respuesta al aumento en la densidad de siembra hasta lograr un máximo de 97%, hacia las 10.000 plantas/ha (Figura 6.6).

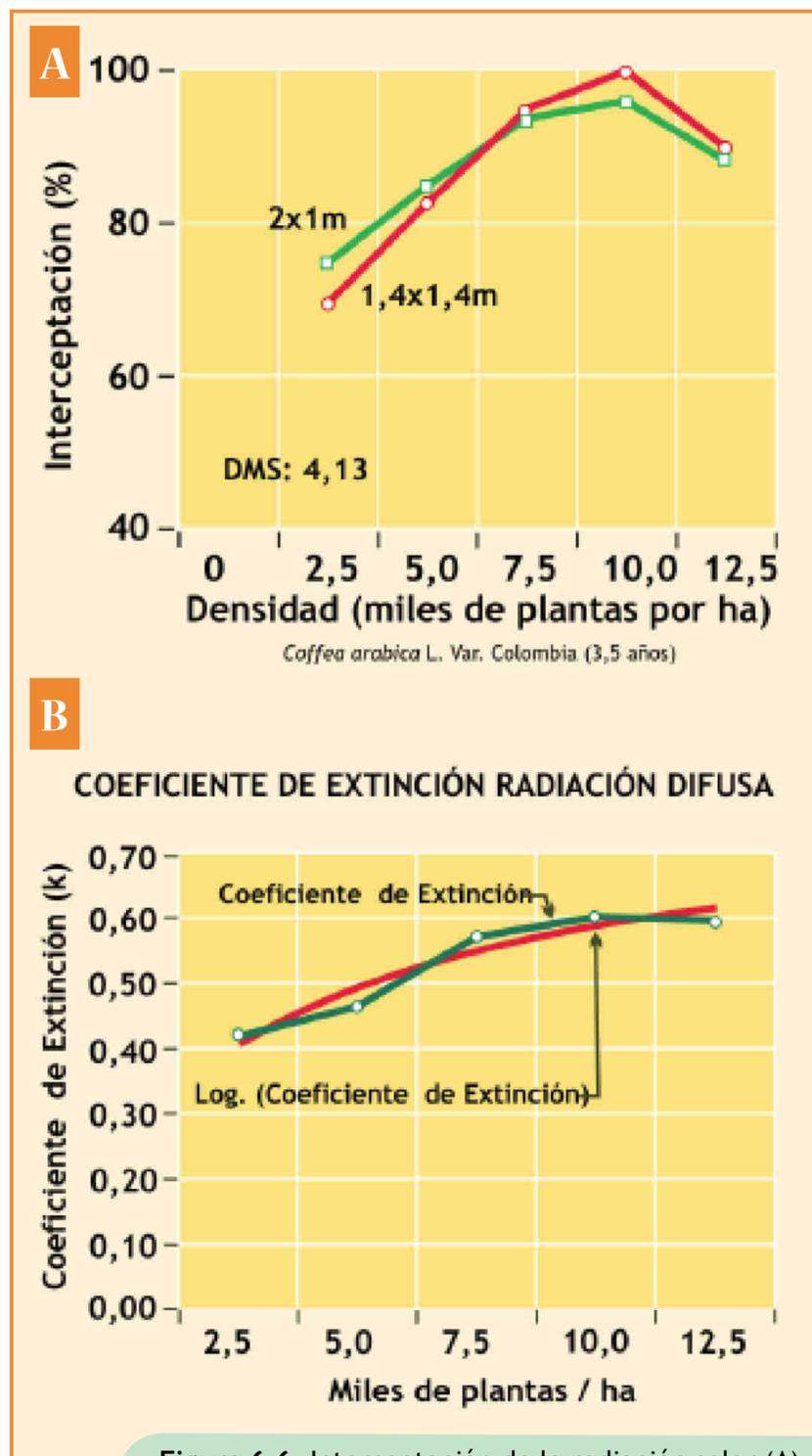


Figura 6.6. Intercepción de la radiación solar (A) y coeficientes de extinción (B), en función del arreglo espacial (Castillo et al., 1997).

Con relación al arreglo espacial en café, las investigaciones han demostrado que la siembra en rectángulo no tiene efecto sobre la producción (Figura 6.7).

En resumen, en condiciones de cultivo óptimas:

Para cultivo al sol

Una baja densidad de siembra implica:	Una alta densidad de siembra implica:
Índice de área foliar bajo: 1 - 2	Índice de área foliar alto: 8 - 10
Baja eficiencia de interceptación de luz	Alta eficiencia de interceptación de luz
Baja productividad	Buena productividad

Para cultivo a la sombra

El cultivo bajo sombra implica:
Índice de área foliar bajo: 2- 4
Baja eficiencia de interceptación de luz
Baja productividad

La eficiencia en la interceptación de la radiación solar es la base de la productividad.

En las Tablas 6.2 y 6.3, se muestra el área de terreno que correspondería a cada planta y el número de plantas por hectárea según la distancia de siembra y el arreglo espacial.

Formas de obtener la densidad de siembra óptima

- Siembra de una planta por sitio
- Siembra de dos o más plantas por sitio
- Siembra de una planta con varios tallos por sitio
- Dejando un tallo (chupón) por zoca
- Dejando varios tallos (chupones) por zoca

Formas económicas de obtener la densidad de siembra óptima. En Cenicafe se han realizado investigaciones con el fin de obtener las densidades de siembra de café óptimas, con una reducción significativa en los costos de instalación. Un ejemplo, es la siembra de dos chapolas por bolsa para instalar en el campo dos plantas de café por sitio o hacer una eliminación temprana de la yema terminal de las plantas en el almácigo, para estimular la formación de brotes múltiples. Como los costos de instalación dependen en gran parte del número de sitios por hectárea, se consigue su reducción si el número de plantas o tallos por sitio se establece desde el almácigo

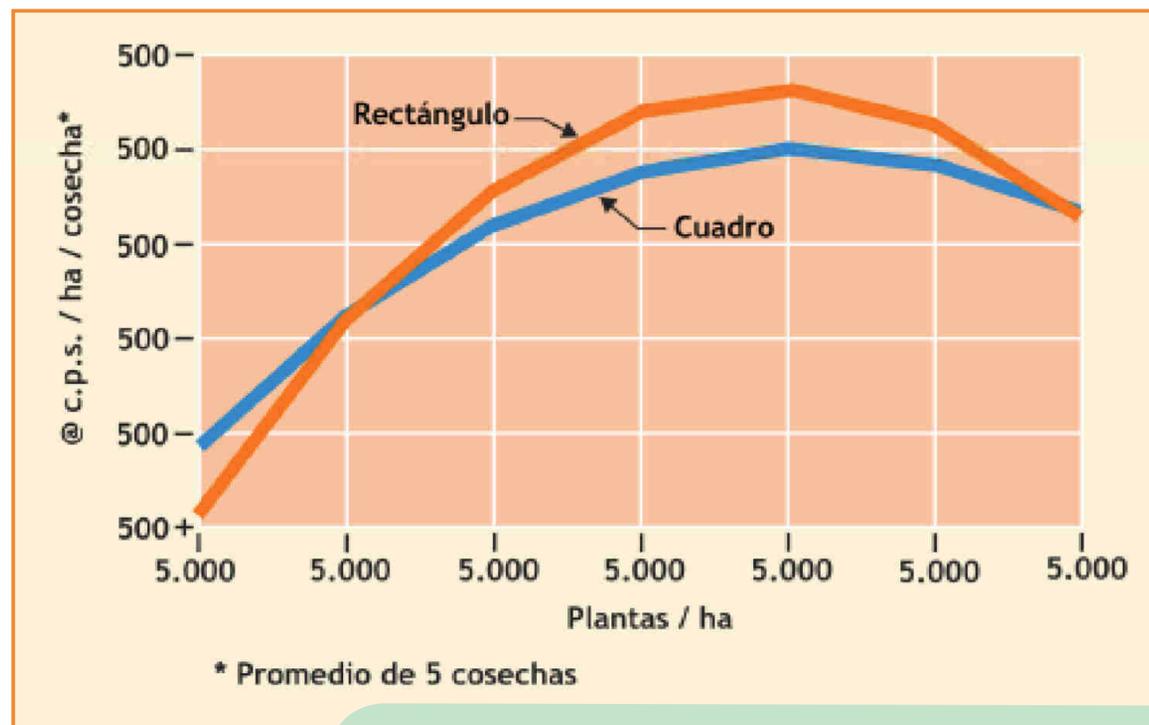


Figura 6.7. Efecto del arreglo en cuadro y rectángulo sobre la producción del café (Uribe y Mestre,1988).

Tabla 6.2. Área (m²) ocupada por las plantas según la distancia de siembra y el arreglo espacial.

Surco/ Planta	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75
1,00	0,50	0,38	1,00	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75
1,25	0,63	0,94	1,25	1,56	1,88	2,19	2,50	2,81	3,13	3,44
1,50	0,75	1,13	1,50	1,88	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75	4,13
1,75	0,88	1,31	1,75	2,19	2,63	3,06	3,50	3,94	4,38	4,81
2,00	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
2,25	1,13	1,69	2,25	2,81	3,38	3,94	4,50	5,06	5,63	6,19
2,50	1,25	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25	6,88
2,75	1,38	2,06	2,75	3,44	4,13	4,81	5,50	6,19	6,88	7,56

El cuadro oscuro corresponde a distancias equidistantes.

Tabla 6.3. Número de plantas por hectárea según la distancia de siembra y el arreglo espacial.

Surco/ Planta	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75
1,00	20.000	13.333	10.000	8.000	6.667	5.714	5.000	4.444	4.000	3.636
1,25	16.000	10.667	8.000	6.400	5.333	4.571	4.000	3.556	3.200	2.909
1,50	13.333	8.889	6.667	5.333	4.444	3.810	3.333	2.963	2.667	2.424
1,75	11.429	7.619	5.714	4.571	3.810	3.265	2.857	2.540	2.286	2.078
2,00	10.000	6.667	5.000	4.000	3.333	2.857	2.500	2.222	2.000	1.818
2,25	8.889	5.926	4.444	3.556	2.963	2.540	2.222	1.975	1.778	1.616
2,50	8.000	5.333	4.000	3.200	2.667	2.286	2.000	1.778	1.600	1.455
2,75	7.273	4.848	3.636	2.909	2.424	2.078	1.818	1.616	1.455	1.322

El cuadro oscuro corresponde a distancias equidistantes.

(Triana,1957; Uribe y Mestre, 1988; Mestre y Arboleda, 1999; Mestre y Salazar, 1995; Arcila, 2001).

El sistema de producción de una planta con dos tallos por bolsa en el almácigo y luego en el campo, se considera que es más ventajoso que sembrar una sola planta. De esta manera, se requieren menos labores de almácigo, menos sitios de siembra y menos actividades al sembrar. Con el sistema de una planta con dos tallos por bolsa, los costos de instalación de una plantación y los costos de los insumos pueden reducirse hasta en un 32% en los dos primeros años (Duque, 2004). En cafetales establecidos, puede aprovecharse el momento de la renovación por zoca para aumentar la densidad de siembra dejando desarrollar uno, dos o tres tallos por planta (Machado, 1958; Mestre y Salazar, 1995).

En síntesis, puede obtenerse la densidad de siembra óptima a un menor costo por medio de las siguientes vías:

- Reducción del número de sitios por hectárea y aumento del número de tallos por sitio.
- Aumento del número de tallos por zoca.

¿Cuántos tallos por planta puedo utilizar?

¿Un tallo?, dos tallos? o tres tallos?.

La decisión depende básicamente de la distancia de siembra.

En la Figura 6.8 se observa que cuando se tienen 2.500 plantas por hectárea se aumenta linealmente la producción, al aumentar el número de tallos por sitio de uno a tres. Cuando se tienen 5.000 plantas por hectárea se aumenta la producción al pasar de uno a dos tallos

por sitio y disminuye cuando se pasa a tres tallos, es decir, en esta situación no es conveniente tener más de dos tallos. En el caso de 10.000 plantas por hectárea la producción se disminuye al aumentar el número de tallos a dos y tres, lo que significa que para esta densidad sólo es recomendable tener un tallo por sitio (Uribe y Mestre, 1988; Mestre y Salazar, 1995).

¿Es conveniente la práctica del raleo?

Conociendo los hábitos del crecimiento y desarrollo del cafeto, es de esperarse que cuando se siembra en densidades altas, en los dos primeros años, la competencia entre las plantas sea mínima y que paulatinamente ésta se incremente hasta llegar a un límite en donde la producción alcanza su máximo y que además, por el grado de desarrollo alcanzado por la planta, la recolección presente dificultades y otras labores del cultivo. Así mismo, se ha pensado en la posibilidad de introducir algún manejo al cultivo, por ejemplo el raleo, después de un determinado número de cosechas.

En una investigación realizada por Uribe y Mestre (1980), se evaluó el efecto en la producción, al combinar una alta densidad de población, del orden de 10.000 plantas por hectárea para los primeros años, con el aumento sucesivo de entresacas para los años posteriores, en comparación con las densidades de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas por hectárea, sin entresacas. Se encontró que la densidad de siembra de 10.000 plantas por hectárea a 1,00 m x 1,00 m durante todo el ciclo de producción, fue la mejor y que las entresacas efectuadas no afectaron la producción de las plantas que quedaron en el campo, ajustándose la producción a la esperada para la nueva densidad de siembra.

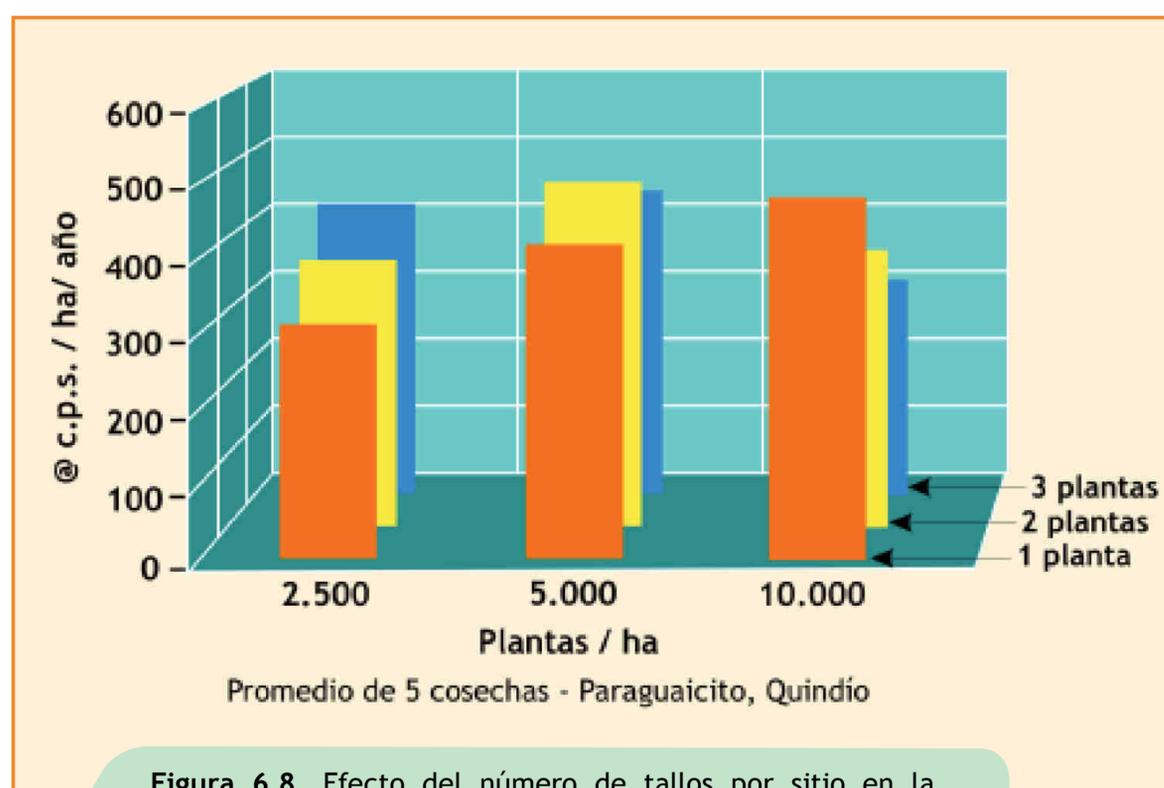


Figura 6.8. Efecto del número de tallos por sitio en la producción (Uribe y Mestre, 1988).

Ventajas de las densidades altas

Entre las ventajas que se obtienen al emplear densidades de siembra altas se encuentran: alta productividad, menor erosión por cobertura completa del terreno,

bajos costos de desyerba, mejor aprovechamiento de los recursos, mayor eficiencia de la mano de obra, reciclaje del material orgánico cuando se zoquea el cafetal y producción de madera.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS. Para la obtención de una alta productividad 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. Esto significa tener una densidad de siembra óptima.

Las ventajas del cultivo del café en altas densidades hacen de esta práctica una de las principales bases de sustentación de la caficultura en explotaciones cafeteras pequeñas, medianas y grandes, volviéndolas estables y eficientes.

Para mejorar la estabilidad y la eficiencia del sistema de producción es necesario ajustar la densidad y el espaciamiento para cada variedad y cada localidad, utilizando criterios que tengan en consideración los objetivos del caficultor, las condiciones locales, el tipo de manejo del cultivo, la fertilidad del suelo y demás aspectos que afectan el desarrollo de la planta.

El sistema de producción de una planta con dos tallos por bolsa en el almácigo permite obtener la densidad de siembra óptima con menores costos de establecimiento.

En las regiones con suelos de buenas propiedades físicas, buena retención de humedad, con una adecuada disponibilidad y distribución de las lluvias, se puede cultivar café a plena exposición solar, con altas densidades de siembra (hasta 10.000 plantas/ha) y con un suministro adecuado de los nutrimentos esenciales y el desarrollo de las prácticas culturales recomendadas por Cenicafe. Bajo este sistema de cultivo, pueden obtenerse 4 ó 5 cosechas, al final de las cuales se debe proceder a la renovación.

En las regiones con baja disponibilidad hídrica o suelos de baja capacidad de retención de agua, puede ser necesaria la utilización de sombrío. El sombrío debe ser regulado ya que bajo condiciones de excesiva sombra la planta de café es menos productiva. Además, bajo sombrío las densidades de siembra que se pueden utilizar (menos de 5.000 plantas/ha) y los requerimientos nutricionales son menores. Bajo este sistema de cultivo también ocurre deterioro de cultivo después de varias cosechas y es necesario proceder a la renovación.

