

Clima y agroforestería

Francisco Jiménez

- **Introducción**
- **Interacciones árbol-cultivo en sistemas agroforestales**
- **Clima y diseño de sistemas agroforestales**
- **Bibliografía**

Clima y agroforestería

Introducción

El clima, caracterizado por los diferentes elementos meteorológicos como la lluvia, la radiación, la temperatura y la humedad, constituye, por mucho, el conjunto de factores ambientales de mayor variabilidad espacial y temporal. Debido a que este conjunto de factores modifica el crecimiento y ocasiona “estreses” físicos y biológicos que frecuentemente son perjudiciales para la producción, tanto a corto como a largo plazo, el conocimiento del clima se convierte en una guía imprescindible para la organización de las intervenciones técnicas necesarias para el manejo adecuado de los cultivos y otras empresas agrícolas.

Bajo cualquiera de sus diferentes factores, el clima ha sido siempre percibido por el hombre como uno de los grandes motores de la producción. El clima (tiempo) real que tiene lugar durante el transcurso del ciclo de cultivo o de producción, permite definir los estados del medio (balance hídrico, estado de desarrollo del cultivo, balance de radiación, etc.) y por consecuencia optimizar las decisiones de gestión y operación de la explotación agrícola, así como de situar las potencialidades actuales de producción. Teniendo en cuenta estos estados, la previsión meteorológica a corto plazo es un medio suplementario para decidir, luego de su análisis, intervenciones inmediatas, eventualmente necesarias (un tratamiento fitosanitario, una poda, un raleo, un riego, por ejemplo).

El conocimiento del clima bajo su forma clásica, con el estudio de la frecuencia de aparición de un fenómeno (análisis frecuencial basado en series largas), abre el camino para la estimación de un futuro probable; este conduce a prever los efectos que pueden resultar de una situación dada y en consecuencia permite elaborar una estrategia posible de intervención a más largo plazo. Este modelo estratégico podrá entonces basarse en los porcentajes de aparición (ocurrencia) de fenómenos que un análisis agroclimático detallado puede suministrar.

En resumen, la Agrometeorología propone un conjunto de métodos conducentes a una buena descripción del estado de un cultivo en un instante dado (análisis de diagnóstico); este conocimiento debe ser prolongado, preferiblemente, por estudios sobre las evoluciones próximas y futuras (análisis de pronóstico), a partir de previsiones meteorológicas en lo que se refiere a corto plazo y a partir de análisis agroclimático, en lo concerniente al conocimiento de situaciones probables a más largo plazo.

Desde el punto de vista de los sistemas agroforestales, ambos enfoques son necesarios. La planificación y determinación de los sistemas a investigar o establecer deben estar estrechamente vinculadas al conocimiento de los requerimientos climáticos de las especies (lluvia, humedad, temperatura, radiación, viento, etc.) y a las características climáticas propias de la zona donde se pretende establecer el sistema agroforestal. Es necesario conocer su comportamiento en el tiempo y en el espacio, basado principalmente en análisis frecuenciales para periodos cortos (por ejemplo 10 días). Por otra parte, la respuesta y variaciones reales del sistema en términos de productividad, conservación y sostenibilidad en cada ciclo de producción, dependen en gran parte de las variaciones continuas, de las variables meteorológicas y su interrelación con las especies vegetales que componen el sistema.

El objetivo de este documento es presentar algunas de las relaciones entre las condiciones meteorológicas y los sistemas agroforestales que fueron discutidas con los participantes del curso "Desarrollo de Sistemas Agroforestales" realizado por el CATIE. Las limitaciones de tiempo (2 horas) no permitieron un análisis más completo y profundo de la temática, así que este artículo representa las notas de clase de la charla denominada "Clima y sistemas agroforestales"..

Interacciones árbol-cultivo en sistemas agroforestales

Debido a que todos los componentes de una comunidad vegetal requieren de los mismos recursos: radiación, nutrientes, agua, dióxido de carbono y oxígeno del suelo, cuando se asocian dos o más especies ocurren diferentes formas de interacción, de las cuales una de las más comunes es la competencia (Etherington, 1985). Aún para un sistema con solo dos especies, el crecimiento y producción de cada una de ellas es determinado por un balance de interacciones que ocurren bajo y sobre la superficie del suelo. Las principales interacciones que se esperan del asocio árbol-cultivo son:

- Modificación del microclima debido al sombreado;
- Aporte mutuo de nutrientes;
- Posibles interacciones sinérgicas (ej. menos plagas);
- Posible competencia de las hojas por CO₂ y radiación solar;
- Posible competencia de las raíces por nutrientes y agua;
- Posibles interacciones alelopáticas.

La importancia relativa de cada interacción depende de las condiciones ambientales específicas, de las características de las plantas que se asocian (sistema radical, vía y eficiencia fotosintética, eficiencia en el uso de agua, características de crecimiento, etc.) y del suelo mismo. En adelante se considerarán solamente los aspectos climáticos.

Modificaciones del microclima

Muchos de los sistemas agroforestales, por su estructura (altura, estratos diferentes) y su elevado índice de área foliar, tienen un contacto muy intenso con la atmósfera. La estructura de un sistema agroforestal, principalmente las combinaciones permanentes en las cuales los componentes coexisten en el tiempo y en el espacio, es bastante semejante a la de un bosque manejado. Por ejemplo, la figura 1 muestra el perfil vertical y horizontal de un sistema agroforestal café con sombra típico del pequeño agricultor en la región de Acosta y Puriscal, en Costa Rica. En ella se observa la presencia de tres estratos más o menos definidos: uno inferior de plantas de café; uno intermedio de frutales y banano y uno superior de árboles maderables.

Los sistemas agroforestales son coberturas muy activas que pueden modificar de manera muy fuerte los procesos meteorológicos, particularmente a escala microclimática, tales como el balance de radiación y la distribución de la radiación solar dentro de la cobertura, el balance de energía, la interceptación y redistribución del agua y la circulación de dióxido de carbono. Así por ejemplo, en sistemas agroforestales densos prevalece un microclima caracterizado por humedad relativa alta, poca variación de la temperatura del aire, velocidad del viento baja y poca evaporación del suelo.

Bajo el efecto de la copa de los árboles se desarrolla un microclima muy variable. Entre los factores que intervienen en la variación están la radiación solar, el viento, las características arquitectónicas del árbol y del cultivo (altura, diámetro de la copa, forma, inclinación, densidad del follaje), el ciclo de producción y pérdida de hojas (de forma natural o forzada mediante podas) que difieren entre especies y con la edad. La interacción continua de todos estos elementos, en el tiempo y en el espacio, dificulta el análisis y estudio del microclima bajo sistemas agroforestales.

La arquitectura y la posición de todos los árboles y plantas forman una estructura compuesta que determinan el microclima y con ello gran parte de la actividad biológica del sistema agroforestal. Los procesos de intercambio con la atmósfera dependen de esa estructura; cuanto más irregular es la superficie del dosel, más intensivos son los procesos debido a que las turbulencias de las masas de aire que ocurren en el momento en que ellas pasan sobre obstáculos y superficies, son también más fuertes. Cuanto mayores son esas turbulencias, mayor es el intercambio de materia (CO₂, agua) y energía entre el sistema agroforestal y la atmósfera. Esto significa que en zonas áridas y semiáridas se deben buscar sistemas agroforestales que sean estructuralmente lo más homogéneos posibles, con el fin de reducir significativamente las pérdidas de agua por evapotranspiración.

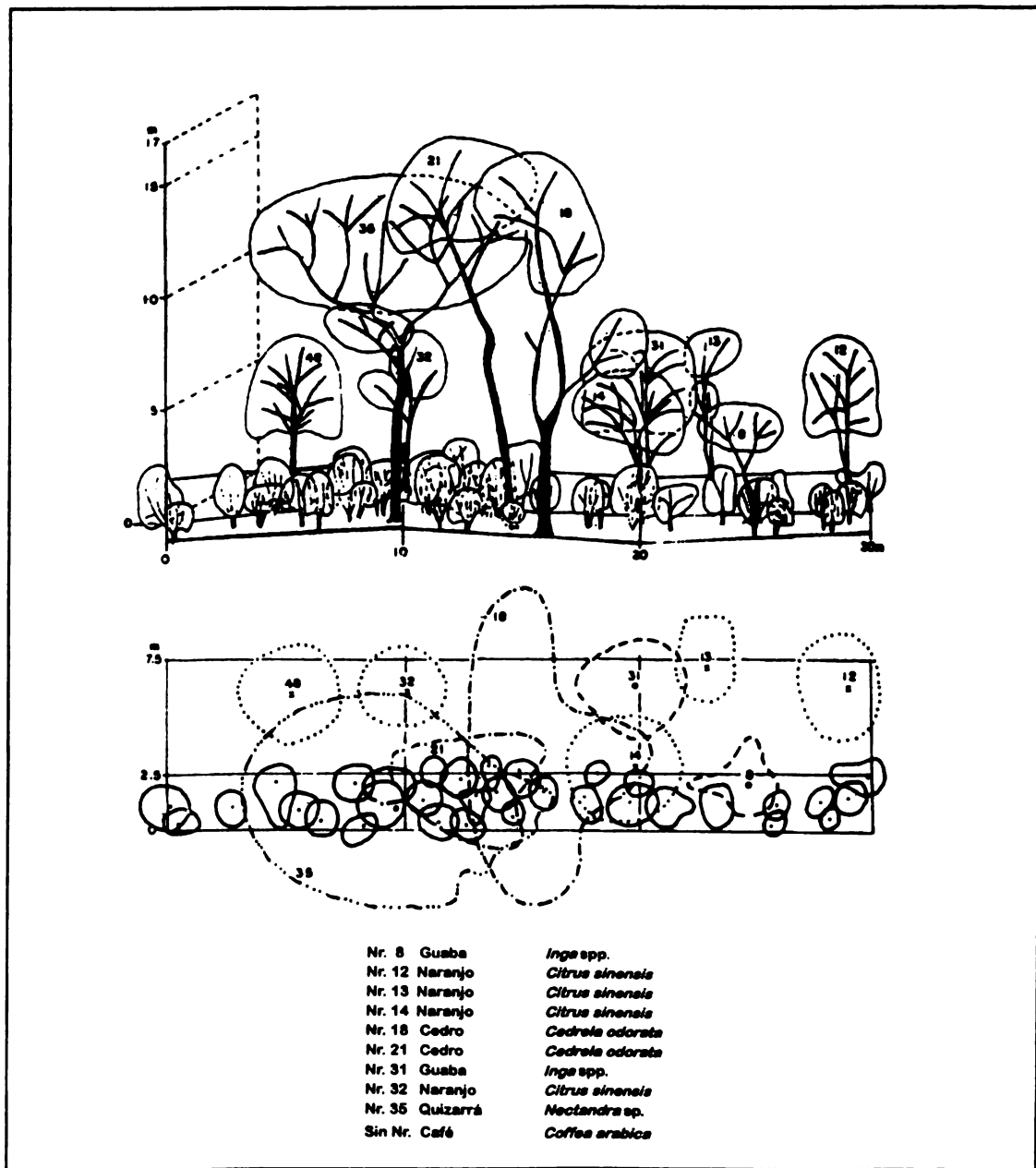


Figura 1. Perfil vertical y horizontal de un cafetal típico del pequeño productor en la región de Acosta y Puriscal, Costa Rica. (Espinoza, 1983).

La disponibilidad de la radiación solar es muy diferente en los distintos estratos del sistema. Los estratos superiores interceptan, absorben y utilizan gran parte de la radiación solar total incidente, lo que ocasiona que los estratos inferiores reciban mucho menos radiación. La calidad de la radiación también es afectada: cerca del suelo predomina la radiación difusa y la proporción de radiación infrarroja es mucho mayor que la visible ya que esta última es mayoritariamente absorbida por las capas superiores

del dosel para activar el proceso fotosintético. En condiciones de coeficiente de intercambio bajo (velocidad del viento baja), la concentración de dióxido de carbono disminuye drásticamente durante el periodo diurno en las zonas de mayor actividad fotosintética (estratos superiores del cultivo y de los árboles).

Debido a que durante el periodo diurno, la radiación solar es el factor dominante del balance de radiación, la reducción de la radiación solar bajo la copa del árbol, reduce la energía disponible para el proceso de evapotranspiración, el calentamiento del aire (flujo de calor sensible), el calentamiento del suelo y el almacenamiento de energía en el dosel.

La amplitud de temperatura (diferencia entre máxima y mínima), generalmente se reduce bajo el efecto de sombreado de los árboles por la reducción de la radiación y porque buena parte de la radiación de onda larga, emitida por el suelo, es atrapada por el dosel inferior.

La reducción de la temperatura causa un aumento de la humedad relativa debido a que la presión de vapor es una función exponencial de la temperatura. Barradas y Fanjul (1986) obtuvieron que el promedio de temperatura máxima fue 5,4 °C y la mínima 1,5 °C, menor en una plantación de café bajo sombra de *Inga jinicuil* (205 árboles/ha, 14 m de altura promedio) que a plena exposición. Así mismo, el déficit de presión de vapor fue sustancialmente reducido. Resultados similares, indicando un efecto amortiguador de los árboles sobre el microclima bajo ellos, fue también reportado para una asociación de coco con cacao en la India (Nair y Balakrisha, 1977).

Los efectos microclimáticos ocasionados por los árboles en los sistemas agroforestales no solamente son importantes por sus efectos físicos (balance de energía) y fisiológicos (fotosíntesis, transpiración, etc.), sino también porque juegan un papel importante como modificadores del ambiente para otros organismos. Por ejemplo, la mayoría de los hongos fitopatógenos que tienen una fuerte dependencia del factor hídrico, el ambiente más húmedo que ocurre bajo la sombra de los árboles favorece principalmente la germinación, el crecimiento del tubo germinativo y la penetración en el hospedante. De manera similar, la mayoría de las bacterias que causan enfermedades fitopatógenas se ven favorecidas por esas condiciones. Otras fases del ciclo de las enfermedades como la diseminación y la colonización (infección) del tejido hospedante podrían verse afectados de manera negativa por el microclima que se genera bajo los árboles.

En los sistemas agroforestales también ocurren modificaciones muy importantes en las transferencias de agua. De la lluvia que llega a la parte superior del sistema agroforestal, parte es interceptada por los árboles que constituyen el estrato superior; de ésta una porción permanece en el dosel hasta que es evaporada y la otra gotea hacia el estrato inferior (cultivos) y el suelo, o escurre a través de los tallos. También parte de la lluvia puede alcanzar el suelo directamente, sin ser interferida por la cobertura vegetal.

Se debe tener presente que las condiciones microclimáticas también están ligadas a varios factores geográficos como la latitud, la altitud, el relieve, la inclinación y la exposición.

La posición latitudinal define el ángulo de incidencia de los rayos solares y la cantidad de radiación solar que se recibe a través del año en función del movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol. Esto condiciona otras características como la temperatura, humedad del aire, y circulación de la atmósfera (vientos, agua).

El aumento de la altitud ocasiona generalmente una disminución de la temperatura debido a la menor densidad del aire (menos moléculas que absorben la radiación) y a que la radiación solar reflejada por la tierra y la radiación terrestre calientan el aire a partir de las capas de aire más cercanas al suelo (más cerca de donde fueron reflejadas o emitidas).

El relieve y la inclinación tienen implicaciones específicas en la distribución y movimiento del agua en una área determinada. En las superficies planas la escorrentía superficial es baja, mientras que en las laderas, se origina un movimiento de agua de las zonas altas hacia las bajas, provocando frecuentemente sequedad en las colinas y abundancia de agua en las zonas bajas.

La exposición también es un factor importante, principalmente en zonas fuera de los trópicos. Así por ejemplo en el Hemisferio Norte, las áreas o pendientes expuestas hacia el Sur reciben más radiación, presentan temperaturas más altas y tasas de evapotranspiración mayores.

Competencia por agua

La competencia por humedad del suelo entre árboles y cultivos en los sistemas agroforestales está muy relacionada con la profundidad del sistema radical. El diseño de muchos de estos sistemas se realiza considerando las diferencias en la profundidad radical del cultivo y el árbol, suponiendo que toman el agua de profundidades diferentes, minimizando así la competencia por este recurso. Sin embargo, la profundidad de raíces no está determinada solo genéticamente, sino que muchas veces es afectada por las condiciones de suelo y clima (Leyton 1981). En todo caso, es casi imposible que no haya, al menos una zona del suelo, de presencia común de raíces de las especies que componen el sistema, lo que hace suponer que bajo condiciones limitantes, en este caso de agua, se establezca un grado importante de competencia. Se puede esperar entonces que bajo estas condiciones, el cultivo sea el más afectado, por tener un sistema radical más superficial y menos extendido y porque la deficiencia hídrica en algunos estados fenológicos, tales como la floración y el llenado del fruto, puede causar pérdidas enormes en los rendimientos.

Así, en sitios donde no ocurren estados hídricos deficitarios o se presentan excesos de agua con relación a la evapotranspiración máxima de los cultivos, las ventajas agronómicas y económicas de la siembra simultánea de árboles y cultivos parece indiscutible. A pesar de ello, en condiciones de suministro limitado de agua (zonas semiáridas por ejemplo), las interacciones bajo la superficie del suelo entre el árbol y el cultivo, en particular la competencia por agua, es de gran relevancia y más importante que los efectos de sombreamiento, como lo indican los resultados obtenidos por Singh *et al.* (1989) en la India en experimentos de cultivo en callejones de leucaena con caupí (*Vigna sinensis*) y sorgo (*Sorghum bicolor*).

Desde este punto de vista, una consideración adicional necesaria es la de seleccionar combinaciones de árbol-cultivo que completen al menos parte de su ciclo de crecimiento, durante el periodo cuando la humedad del suelo es suficiente para el crecimiento y desarrollo normal. La poda de raíces de los árboles que puede reducir parcialmente la competencia por agua es otro factor importante a tomar en cuenta. Aunque con muchas especies leñosas perennes se puede asumir que extraen agua de regiones más profundas del suelo que el cultivo agrícola, sus efectos sobre el balance hídrico general son mucho más complejas, principalmente por la intercepción y redistribución del agua, como se indicó antes.

A continuación se analizan algunos posibles efectos de los sistemas agroforestales sobre algunos procesos hidrometeorológicos. Obviamente son indicaciones generales, que pueden por lo tanto, variar para sistemas, combinaciones y otros arreglos específicos.

Precipitación incidente

La precipitación incidente se define como la precipitación que llega a la parte superior de la vegetación. Aunque existen algunos mitos en este respecto es importante aclarar que los procesos atmosféricos que condicionan y causan la lluvia generalmente no dependen de la cobertura vegetal sobre la cual precipita el agua, lo que significa que una determinada superficie agroforestal no influye sobre la ocurrencia, cantidad y duración de eventos de lluvia a los cuales está expuesta. Así, los sistemas agroforestales generalmente no incrementan la precipitación incidente.

Precipitación neta

La precipitación neta es la cantidad de lluvia que llega al suelo por goteo directo, goteo desde el follaje y escorrentía por los tallos. Bajo un mismo régimen de lluvias, la precipitación neta en sistemas agroforestales puede ser considerablemente menor que en otras coberturas vegetales, debido a la intercepción de buena parte de la lluvia por el dosel de los árboles y del cultivo, lo que impide que una parte importante de la precipitación bruta llegue hasta el suelo. En esto juega un papel muy importante los componentes biológicos del sistema (especies) y su manejo. En un estudio realizado en Turrialba, Costa Rica, en un sistema agroforestal de café con sombra de *Erythrina poeppigiana* (555 árboles/ha,

con dos podas por año) y café con sombra de *Cordia alliodora* (135 árboles/ha), Jiménez (1986) encontró la precipitación neta fue de 84% para el primer sistema mencionado y 92,5% para el segundo.

Intercepción, evaporación, transpiración y evapotranspiración

Intercepción: es definida como la cantidad de agua proveniente de la lluvia retenida por el dosel de la cobertura vegetal y luego evaporada. Se pueden distinguir dos tipos de intercepción: absoluta y relativa.

La intercepción absoluta es la cantidad de agua que puede ser retenida por la cobertura vegetal, en función de su estructura, densidad e índice de área foliar. Corresponde a lo que se denomina capacidad de almacenamiento de la cobertura. Por su parte, la intercepción relativa depende de las características del evento de lluvia y disminuye porcentualmente conforme aumenta la cantidad de lluvia por evento.

Así, una determinada cantidad de lluvia sobre la misma cobertura puede causar diferentes niveles de intercepción dependiendo de la cantidad y duración de los eventos. La mayoría de reportes de la literatura sobre intercepción de lluvia corresponden a coberturas forestales, para las cuales los valores de intercepción relativa son del orden de 10 a 30% y los absolutos de 2 a 4 mm. Jiménez (1986) obtuvo una intercepción relativa de 16% para el sistema agroforestal café con sombra de *Erythrina poeppigiana* y 7,5% para café con sombra de *Cordia alliodora*, en el estudio antes mencionado.

Evaporación: la evaporación se refiere en este caso a la vaporización de agua desde el suelo. La cantidad de agua evaporada desde suelos bajo sistemas agroforestales es baja por las condiciones microclimáticas que predominan bajo ellos, en la superficie del suelo: poca radiación solar, poco viento, humedad relativa alta, poca oscilación térmica. A esto hay que agregar que en muchos casos el manejo del sistema agroforestal incluye la poda de los árboles, obteniéndose una cobertura vegetal (mulch) sobre el suelo que limita las pérdidas de agua.

Transpi. acción: la transpiración es el mecanismo fisiológico de pérdida de agua de las plantas a través de los estomas, principalmente. Aunque la demanda y consumo de agua por las plantas depende de las características climáticas y varía por lo tanto entre zonas, se puede afirmar que los sistemas agroforestales tienen tasas de transpiración muy altas debido a sus índices foliares. Casualmente la estrategia de podar los árboles de sombra durante periodos de "estrés" hídrico, tiene como objetivo reducir las pérdidas de agua por ese medio.

Evapotranspiración: la evapotranspiración incluye el total de agua vaporizada por la cobertura vegetal (evaporación desde el suelo, evaporación del agua interceptada y transpiración). Los sistemas agroforestales tienen altas tasas de evapotranspiración, debido a su alta capacidad de almacenamiento de agua, a los valores elevados de transpiración y a los sistemas radicales extensos, densos y profundos.

Infiltración y escorrentía

El efecto que pueden tener los sistemas agroforestales sobre las características hidrodinámicas del suelo depende en gran medida del tipo de sistema y su manejo. En sistemas como cacao, café y té con sombras forestales, con frecuencia existe una capa de materia orgánica en descomposición y la ausencia de un uso intensivo, situaciones que favorecen el proceso de infiltración y evitan la destrucción de los agregados y desecamiento del suelo. Los suelos secos o con falta de agregación, tienen poca capacidad de infiltración y favorecen la escorrentía superficial, lo que a su vez ocasiona procesos de erosión. En general, los suelos bajo los sistemas agroforestales tienen buenas estructura y altas capacidades de infiltración; incluso es frecuente que esta capacidad supere la intensidad de las lluvias, indicando que la mayor parte del agua que llega al suelo bajo la cobertura agroforestal perenne se infiltra.

La alta capacidad de infiltración de los suelos bajo los sistemas agroforestales con perennes se debe principalmente a factores tales como: densidades del suelo relativamente bajas y estructura favorable del suelo, uso poco intensivo, intercepción parcial de la precipitación incidente, cobertura del suelo por material orgánico y ausencia de golpeteo directo de las gotas de lluvia en el suelo mineral. Además las raíces de los árboles y los cultivos forman canales que favorecen la infiltración y percolación del agua.

En resumen se puede afirmar que muchos sistemas agroforestales con perennes contribuyen a aumentar la capacidad de infiltración de los suelos y por lo tanto a reducir la escorrentía superficial.

Impacto de las gotas de lluvia

La estratificación del dosel en los sistemas agroforestales y el mulch que se acumula, son factores importantes en reducir la energía cinética de la lluvia, contribuyendo así a la conservación del suelo al reducir la escorrentía superficial que es el principal causante de la erosión de los suelos tropicales. Las gotas de lluvia al impactar en el dosel de los árboles se dividen en gotas más pequeñas, reduciendo así su masa y velocidad. La cobertura vegetal inferior (cultivos) amortigua el impacto de las gotas de lluvia que llegan directamente a ella y del agua que gotea desde la copa de los árboles reduciendo su poder erosivo.

Producción de agua

Por analogía con los bosques, donde los resultados de varias investigaciones en cuencas experimentales, particularmente las realizadas para probar la hipótesis de que la cobertura vegetal afecta la producción de agua, han mostrado que las cuencas cubiertas por bosques producen menos agua que cuando están en barbecho, pasto o cultivos pequeños (Hewlett, 1970; Bosch y Hewlett, 1982; Hamilton

et al., 1985), se puede esperar que los terrenos bajo sistemas agroforestales con elevados índices de área foliar producen también menos agua. En bosques de zonas húmedas tropicales, la reducción en la producción de agua es de aproximadamente 10% (Bruijnzeel et al., 1987). La menor producción de agua en bosques en comparación con otras coberturas vegetales se debe principalmente a su elevada tasa de interceptación y evapotranspiración.

Competencia por radiación solar

La competencia por luz parece ser la más frecuentemente observada, al menos en sistemas de cultivo en callejones (Ssekabembe, 1985) y también la que ha sido más documentada. A pesar de ello, gran parte de esa información es indirecta como lo muestran los resultados publicados por el IITA (1983), según los cuales en callejones de 2 m de ancho de *Gliricidia sepium* se produjo la mayor reducción en el rendimiento de *Vigna unguiculata*, seguida por *Leucaena leucocephala*, *Alchornea cordifolia* y *Acio barberii*, siguiendo un orden más o menos decreciente del tamaño y densidad de la copa de los árboles. En el mismo estudio, pero usando callejones de 4 m de ancho no hubo diferencias grandes en el rendimiento de vigna, excepto en callejones de *L. leucocephala* que redujo el rendimiento en 30% con respecto a las otras especies arbóreas.

En Nigeria, Verinumbe y Okali (1985) mostraron que la competencia por luz fue más crítica que la competencia radical para maíz cultivado entre árboles de teca (*Tectona grandis*). Kang et al. (1981) encontraron una reducción significativa en el rendimiento de maíz cerca de los surcos de leucaena con respecto al rendimiento en el centro de callejón. Otros ejemplos donde el sombreado resultó en una reducción del rendimiento de ñame y yuca son citados por Ssekabembe (1985).

La estrecha relación entre radiación, fotosíntesis y producción de biomasa hace que la disponibilidad de energía luminica sea un factor fundamental cuando se analizan interacciones en sistemas de cultivo con varias especies. La más alta producción fotosintética en asociaciones de plantas se alcanza cuando cada planta es provista con la cantidad mínima de luz que requiere para una fotosíntesis máxima. En algunas especies adaptadas a la sombra, el punto de saturación de la luz para fotosíntesis puede ser alcanzado con menos de 100 mmoles/m²s (Jones, 1983), esto es cerca del 5% de la alcanzada a pleno sol al mediodía. Sin embargo, la mayoría de las más importantes plantas cultivadas tienen altos requerimientos de luz y los valores típicos del punto de saturación, en cultivos C3, está en el rango de 540-1440 mmoles/m²s (McCree, 1981). También Nobel (1991) indica que un flujo energético de cerca de 600 mmoles/m²s es necesario para la saturación lumínica en la mayoría de las plantas C3.

Transmisión de la radiación solar a través de la copa de los árboles.

La cantidad de radiación que pasa a través del dosel vegetal depende de varios factores, principalmente de la estructura, caracterizada por la cantidad de follaje (índice de área foliar), de la

distribución en el espacio y de la inclinación de las hojas. El índice de área foliar (IAF) es el factor dominante en la determinación de la intercepción de radiación solar en doseles continuos (Palmer y Jackson, 1977). La inclinación tiene también una fuerte influencia en la intercepción de luz y con ello en la transmisión (Campbell, 1977, Ross, 1981). A valores altos de IAF, los doseles en los que las hojas superiores son más erectas que las hojas bajas, tienden a tener una productividad total más alta, debido a que una cantidad dada de radiación genera más fotosíntesis cuando se distribuye sobre una área foliar mayor (Pearce *et al.*, 1967, Campbell, 1977, Nobel, 1991).

En algunos sistemas agroforestales, el objetivo del manejo de la cobertura vegetal aérea es reducir al máximo posible la competencia por radiación. Desde este punto de vista, el uso de árboles con hojas bastante erectas, pequeñas y de alta eficiencia en el uso de la radiación solar, serían los ideales para maximizar el aprovechamiento de este recurso por parte del sistema. Especies que reúnan estas características son difíciles de escoger, debido a que ya otras especies han sido establecidas o porque los objetivos de producción favorecen la selección de otras especies. Sin embargo, queda la alternativa de manejar la copa o dosel mediante podas que favorezcan una mejor distribución y aprovechamiento de la energía solar.

Varios estudios han sido publicados sobre la transmisión de radiación en sistemas agroforestales. Por ejemplo Kang *et al.* (1985) midieron el porcentaje de radiación solar global incidente sobre los cultivos de maíz y vigna antes y después de la poda de *Leucaena leucocephala*, en callejones de 4 m de ancho. En el caso del maíz el porcentaje varió de 51% cerca de los árboles a 81% en el centro del callejón antes de la poda y entre 89% y 99%, respectivamente, después de la poda. En el caso de vigna, el porcentaje varió de 45% a 90% antes de la poda y 76% a 98% después de esta práctica de cultivo.

Yamoah *et al.* (1986) midieron la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente sobre malezas que crecían entre los callejones de *Gliricidia sepium*, *Flemingia congesta* y *Cassia siamea* durante el período de barbecho. El porcentaje de RFA bajo los árboles con relación a la incidente sobre los mismos varió, de 17% a 1 m del surco hasta 55% a 2 m para *G. sepium*; de 43% a 56% en *F. congesta* y fue solo del 8% a 2 m en el caso de *C. siamea*.

Muschler (1991) estudió el área de suelo sombreada y la transmisión de la radiación fotosintética en tres especies leguminosas (*Erythrina fusca*, *E. berteroana* y *G. sepium*) usadas como soporte vivo para el cultivo de la pimienta negra, en la región Atlántica de Costa Rica. Seis meses después de la poda de los árboles, en un día claro, a las 7:30 y 11:30 horas, *G. sepium* sombreó el 45,7% y 29,9% del suelo; *E. fusca* el 64,8% y 44,6% y *E. berteroana* el 81,2% y 56,6%, respectivamente. La transmisión de RFA bajo la copa de los árboles varió de 27% después de dos meses, a menos de 5% luego de seis meses de la poda. En este último caso, en días claros, cerca del mediodía y bajo la copa de los árboles, la RFA transmitida fue 14,6%, 9,7% y 6,9% para *G. sepium*, *E. fusca* y *E. berteroana*, respectivamente. Integrand

para todo el dosel (áreas sombreadas y no sombreadas; con espaciamiento de 2,5 m x 2,5 m) y promediando para las diferentes horas del día, después de seis meses de la poda de los árboles, la RFA transmitida fue 69%, 52% y 35% de la radiación a pleno sol, para *G. sepium*, *E. fusca* y *E. berteriana*, respectivamente.

Modelación de la radiación solar en sistemas agroforestales

La intercepción de la radiación solar por parte de la planta depende de su arquitectura y características ópticas. Para extender el análisis de plantas individuales a coberturas vegetales se debe tomar en cuenta el arreglo espacial de ellas en la cobertura (Ross, 1981).

La modelación de la distribución de la radiación solar dentro de la cobertura vegetal, tomando en cuenta todas las características estructurales y ópticas, es muy compleja y requiere gran número de mediciones. La complejidad es aún mayor cuando se trata de coberturas heterogéneas, como son los sistemas agroforestales. Por ello, la mayoría de esfuerzos en modelación de la radiación solar en sistemas agroforestales son bastante simplificados y se refieren principalmente al modelaje de los patrones de sombra de los árboles, los cuales definen la cantidad y calidad de radiación que es transmitida hasta el cultivo. Nygren (1990) presentó un esquema de los principales factores que podrían tomarse en cuenta en este tipo de modelación (figura 2).

Varios autores han propuesto modelos de intercepción de la radiación solar en sistemas agroforestales. sin embargo, la mayoría de ellos presentan importantes limitaciones operativas y principalmente de «universalidad» de aplicación.

Debido a la discontinuidad del dosel en muchos de los sistemas agroforestales, la penetración de la luz no puede ser calculada a partir de la ley de Lamber-Beer desarrollada por Monsi y Saeki para coberturas vegetales homogéneas (Jackson, 1989). Este modelo fue modificado por Jackson y Palmer (1979) y Jackson (1983) para sistemas agroforestales. El mismo describe la fracción de radiación T que pasa las copas de los árboles y que estaría disponible para el cultivo:

$$T = T_r + (1 - T_r) e^{-kL'}$$

donde T_r representa la parte de la radiación difusa y directa que alcanza la superficie del suelo sin ser interceptada por las copas de los árboles; L' es el índice de área foliar de los árboles que interceptan luz: $L' = L / (1 - T_r)$ y k es el coeficiente de extinción de la luz.

Varios otros autores, entre ellos Quesada *et al.* (1987) y Nygren (1990), han desarrollado también modelos para determinar la transmisión de radiación solar en sistemas agroforestales.

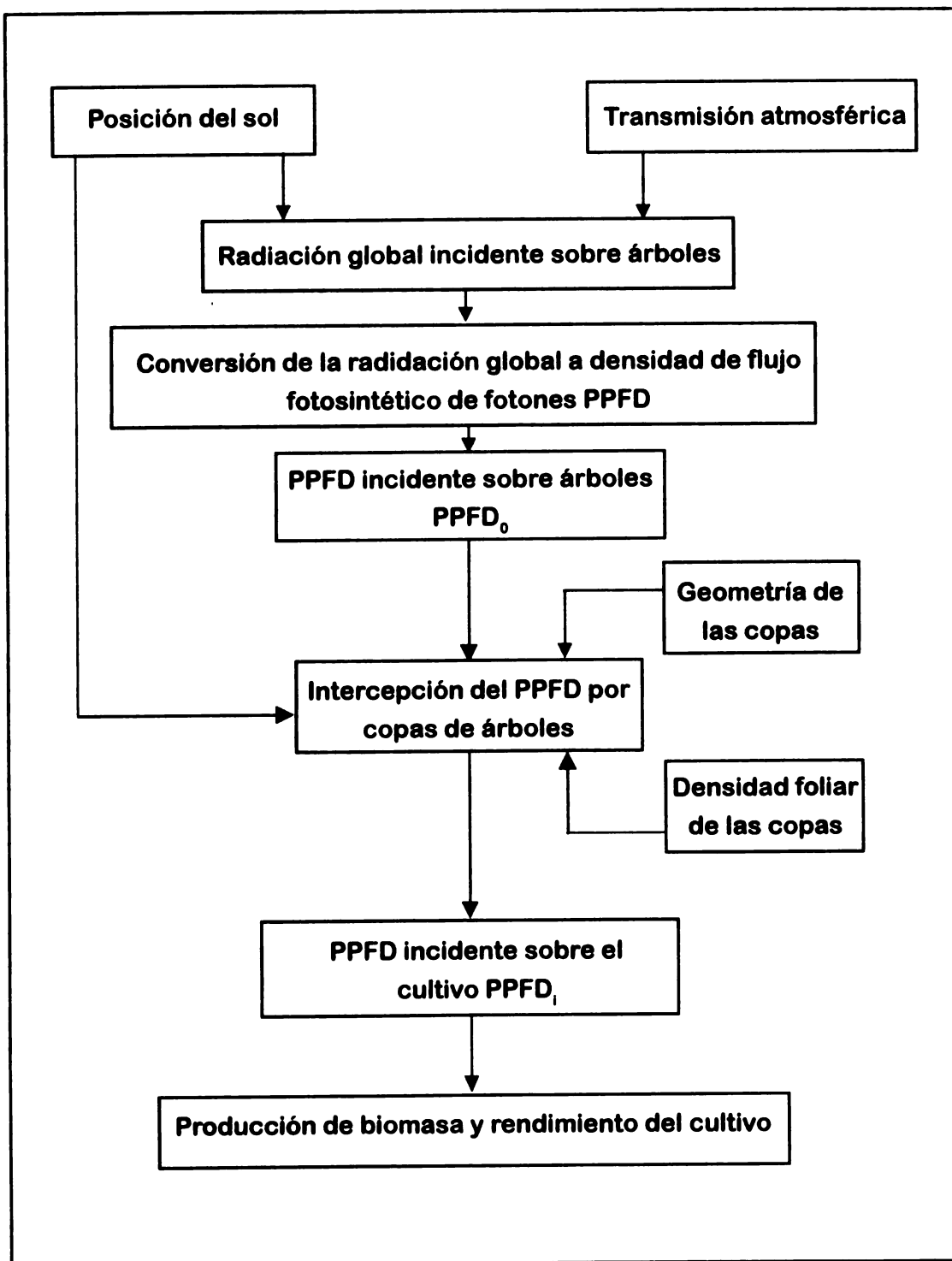


Figura 2. Esquema de los principales factores para tomar en cuenta en el modelaje de patrones de sombra de árboles en sistemas agroforestales. (Adaptado de Nygren, 1990).

Clima y diseño de sistemas agroforestales

El diseño de sistemas agroforestales es una estrategia de optimización que busca maximizar los efectos beneficiosos de los árboles y minimizar la competencia por radiación solar, CO₂, agua y nutrientes. Los efectos son más importantes en algunos sistemas como el cultivo en callejones, cultivos con soportes vivos y cultivos bajo sombra de árboles.

Aunque se habla de manera generalizada de la importancia de reducir la competencia entre el cultivo y los árboles, existe poca información cuantitativa al respecto, lo que limita la búsqueda de diseños óptimos del sistema. La alta variabilidad de los factores meteorológicos (ej. radiación solar) dentro de los sistemas agroforestales necesita una gran cantidad de sensores y repeticiones que tienen un elevado costo. Asimismo los diseños experimentales tradicionales tienen serias limitaciones debido al elevado número de tratamientos e equipo requeridos para evaluarlos.

Como posible solución a esta problemática, se pueden usar diseños sistemáticos. Su modificación agroforestal son los experimentos en que se maximiza la zona transitoria entre el cultivo y los árboles ("tree-crop interfase experiments"). Estos son especialmente aptos para estudios micrometeorológicos. Los mejores arreglos árbol-cultivos encontrados en esos experimentos deben ser comprobados con experimentos estadísticamente diseñados.

Otro enfoque posible es el uso de modelos de simulación para explorar un gran número de diseños y comprobar solo los mejores en el campo. Una vez que el modelo es validado, este sistema trae mucho ahorro de dinero, trabajo y tiempo y brinda entonces mucho más elementos para un mejor diseño.

Bibliografía

- BARRADAS, V. L.; FANJUL, L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open grown coffee (*Coffea arabica*) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 101-112.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation change on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- BRUIJNZEEL, G. W. 1990. Hydrology of moist forests and effects of conversion: a state of knowledge review. Paris, France. UNESCO. 224.
- CAMPBELL, G. S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, Springer. 159 p.
- ESPINOZA, L. 1983. Estructura general de cafetales de pequeños agricultores. In: J. Heuvelodp y L. Espinoza, eds. *El componente arboreo en Acosta y Puriscal, Costa Rica*. CATIE. p. 72-84.
- ETHERINGTON, J. R. 1985. *Environment and Plant Ecology*. London, Wiley. 347 p.
- HAMILTON, L. S.; BONELL, M.; CASSELLS, D. S; GILMOUR, D. A. 1985. The protective role of tropical forests-a state of knowledge review. s.n.t. Presentado en World Forestry Congress (9, 1985, México). 23 p.
- HEWLETT, J. D. 1970. Review of the catchment experiment to determine water yield. In: Joint FAO/USSR International Symposium on Forest Influences and Watershed Management . Moscow, USSR. Proceedings s.n.t. p. 145-155.
- IITA. 1983. Annual Report for 1982. Ibadan, Nigeria. p. 153-159.
- JACKSON, J. E. 1983. Climate and crop-tree mixtures. In: P. A. Huxley, ed. *Plant Research and Agroforestry*, ICRAF, Nairobi, Kenya. p. 365-377.
- JACKSON, J. E. 1989. Tree and crop selection and management to optimize overall system productivity, especially light utilization in agroforestry. In: W. S. Reifsnnyder; T. O. Darnhofer, Eds. *Meteorology and Agroforestry*. Nairobi, Kenya, ICRAF. p. 163-173.
- JACKSON, J. E.; PALMER, J. W. 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Ann. Bot.* 44: 381-383.
- JIMENEZ, F. 1986. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café-poró y café-laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis MSc., UCR-CATIE. 104 p.
- JONES, H. G. 1985. *Plants and Microclimate*. Oxford, Alden Press. p.152.
- KANG, B. T.; WILSON, G. F.; SIPKENS, L. 1981. Alley cropping maize (*Zea mays*) and *Leucaena* (*Leucaena leucocephala*) in Southern Nigeria. *Plant and Soil* 63: 165-179.
- KANG, B. T.; GRIMME, H.; LAWSON, T. 1985. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with *Leucaena* on a dandy soil in Southern Nigeria. *Plant and Soil* 85: 267-277.

- LAWSON, T. L.; KANG, B. T. 1990. Yield of maize and cowpea in an alley cropping system in relation to available light. *Agricultural and Forest Meteorology* 52: 347-357.
- LEYTON, L. 1981. Crop water use: principles and some considerations for agroforestry. *In: P. A. Huxley, ed. Plant Research and Agroforestry. Proceedings of a consultative meeting held in Nairobi.* p. 377-399.
- MCCREE, K. J. 1981. Photosynthetically active radiation. *In: O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond y C. B. Ziegler, eds. Physiological Plant Ecology.* New York, Springer. p. 41-45.
- MONTEITH, J. L., ONG, C. K.; CORLETT, J. E. 1991. Microclimate interactions in agroforestry systems. *In: P.G. Jarvis, ed. Agroforestry: principles and practice.* Amsterdam, Elsevier. p. 31-44
- MURRAY, D. B.; NICHOLS, R. 1966. Light, shade and growth in some tropical plants. *In: R. Baimbridge, G. C. Evans y O. Rackham, eds. Light as an ecological factor.* Oxford, Blackwell. 452 p.
- MUSCHLER, R. 1991. Crown development and light transmission of three leguminous tree species in an agroforestry system in Costa Rica. Thesis Master of Science, University of Florida. 140 p.
- NAIR, P. K. R.; BALAKRISHNAN, T. K. 1977. Ecoclimate of a coconut plus cacao crop combination on the west coast of India. *Agricultural and Forest Meteorology* 18: 455-462.
- NYGREN, P. 1990. Modelo de patrones de sombra de surcos de *Erythrina poeppigiana* en sistemas de cultivo en callejones. Tesis MSc., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 142 p.
- NOBEL, P. S. 1991. *Physiochemical and Environmental Plant Physiology.* New York, Academic Press. 635 p.
- PALMER, J. W.; JACKSON, J. E. 1977. Seasonal light interception and canopy development in hedgerow and bed system apple orchards. *Journal of Applied Ecology* 14: 539-549.
- PEARCE, R. B.; BROWN, R. H.; BLASER, R. E. 1967. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angle. *Crop Science* 7: 321-324.
- QUEDADA, F.; SOMARRIBA, E.; VARGAS, E. 1987. Modelo para la simulación de sombra de árboles. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Informe técnico No. 118. 91 p.
- ROSS, J. 1981. *The radiation regime and architecture of plants stands.* The Hague, W. Junk. 391 p.
- SINGH, R. P.; ONG, C. K.; SAHARAN, N. 1989. Above and below ground interactions in alley cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems* 9: 259-274.
- SSEKABEMBE, C. K. 1985. Perspectives on hedgerow intercropping. *Agroforestry Systems* 3: 339-356.
- VERINUMBE, I.; OKALI, D. U. U. 1985. The influence of coppiced teak (*Tectona grandis*) regrowth and roots on intercropped maize (*Zea mays*). *Agroforestry Systems* 3: 381-386.
- YAMAOH, C. F.; AGBOOLA, A. A.; MULONGOY, K. 1986. Decomposition, nitrogen release and weed control by prunings of selected alley cropping shrubs. *Agroforestry Systems* 4: 236-246.