

La producción vegetal en relación a la Radiación Solar

María Dolores Curt (*)
Isaura Martín (**)
Paloma Manzanares (***)

- Balance de la radiación
- Índice de área foliar (LAI)
- Aplicación a la densidad de siembra y plantación

INTRODUCCION

El rendimiento de un cultivo está determinado por los procesos que afectan a la producción primaria de las plantas, y por los factores que limitan o actúan sobre ésta. El estudio de los factores que inciden sobre la producción vegetal es un área de investigación de gran interés, ya que puede tener aplicación inmediata en aspectos culturales agrícolas tan sencillos como pueden ser la fecha de plantación, la densidad de siembra o la fertilización. Entre estos factores destaca la radiación solar, recurso fundamental que sostiene la producción vegetal.

Si bien es cierto que en cualquier explotación agrícola se intenta obtener el máximo rendimiento con la optimización de los recursos al alcance del agricultor, con frecuencia se olvida el papel fundamental que juega la radiación solar en el proceso de producción. A este respecto, en este artículo se trata de exponer la estrecha relación existente entre radiación solar y producción vegetal, destacándose la importancia de una adecuada utilización de este recurso.



FIGURA 1: Cultivo experimental de sorgo azucarero desarrollado en la E.T.S.I.A. Agrónomos de Madrid, con un desarrollo de hojas que realiza una intercepción máxima de radiación. La productividad estimada de este cultivo en 1989 fué de 45 t/ha de materia seca aérea.

(*) Dr. Ingeniero Agrónomo. Dpto. Producción Vegetal: Botánica y Protección Vegetal. E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

(**) Dr. Ingeniero Agrónomo. Dpto. Producción y Tecnología de Alimentos. INIA.

(***) Dr. en Ciencias Biológicas. Dpto. Producción y Tecnología de Alimentos. INIA.

LA PRODUCCION VEGETAL

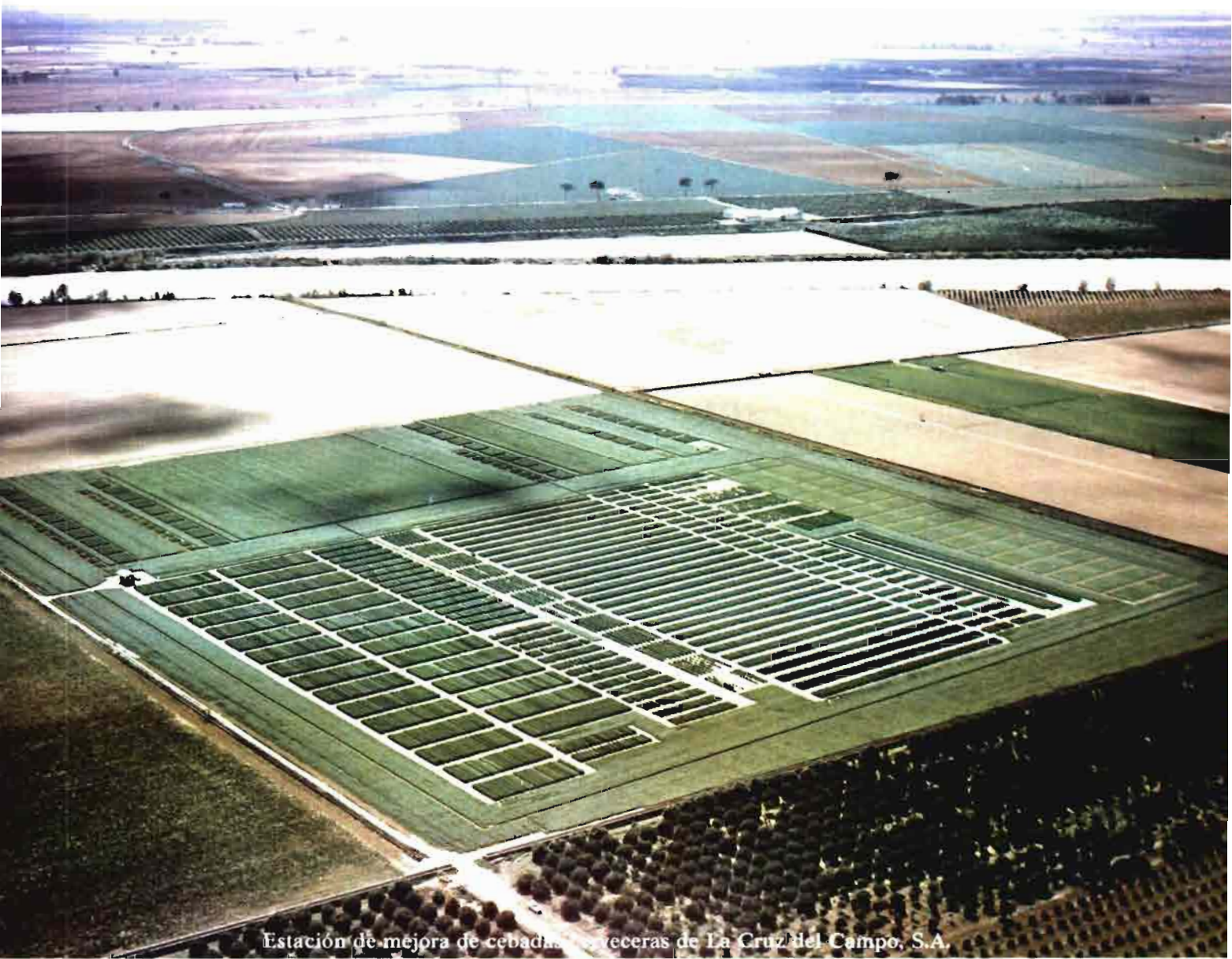
Las plantas son seres vivos autótrofos que actúan como auténticos captadores de la radiación solar. Mediante la fotosíntesis transforman la energía radiante en energía química, que queda asociada a los compuestos orgánicos de la biomasa.

Con la intervención de la radiación solar las plantas fijan el CO₂ atmosférico en compuestos orgánicos carbonados. Según el proceso de fijación CO₂, las plantas se pueden agrupar en tres tipos metabólicos: C₃, C₄ y CAM. Si el primer compuesto estable en que aparece fijado el CO₂ es de 3 átomos de carbono, la planta se dice que es C₃; si es de 4 átomos de C, C₄. Las CAM, de ruta metabólica semejante a las C₄, muestran un desfase temporal entre captación de CO₂ (en la noche) y la fijación (en el día). Entre estos tres tipos metabólicos existen además otras muchas diferencias, de tipo bioquímico, fisiológico y morfológico, y que, finalmente, se manifiestan en la adaptación a distintos ambientes y en la productividad final.

La mayoría de las plantas superiores son del tipo C₃, incluyéndose numerosos cultivos de climas templados, como trigo, cebada, girasol, etc. Plantas del tipo C₄ son algunas especies de zonas áridas, como el abrojo, el atriplex, ..., y otras de climas tropicales y templado cálidos, como la caña de azúcar, el maíz o el sorgo. El tipo CAM es una vía metabólica mucho menos frecuente, típico de especies de climas muy áridos, como por ejemplo, el sisal. En términos generales, y según distintos



El nuevo Grupo Alimentario Español
proyectado hacia Europa.



Estación de mejora de cebada y seceras de La Cruz del Campo, S.A.

LA CRUZ DEL CAMPO, S.A.

FABRICAS DE CERVEZA Y MALTA

ENTIDAD PRODUCTORA DE SEMILLAS

autores, si se considera cada especie en su ambiente natural, las C₃ son menos productivas que las C₄.

Estrictamente, se entiende por producción vegetal la biomasa total (raíces y biomasa aérea) o peso seco de materia orgánica asimilada por una comunidad vegetal, reservándose el término productividad vegetal para la producción vegetal por unidad de superficie de terreno y unidad de tiempo.

Desde un punto de vista agrícola, no toda la biomasa producida por una especie es útil económicamente (por ejemplo, paja y raíces en un cultivo cerealista), aunque toda ella sea el resultado de la captación de la energía solar. Ambas producciones, la total y la útil, son distintas facetas del mismo proceso —la fotosíntesis— y para relacionarlas, se recurre al denominado índice de cosecha (HI): cociente de la producción útil económicamente y la producción en biomasa total. Para el análisis de la productividad vegetal en relación con la radiación solar, conviene referirse a biomasa total.

LA RADIACION SOLAR

Características de la radiación solar.

El sol es, por excelencia, la fuente primaria de energía radiante, caracterizada por ser propagada a través del espacio en forma de pulsaciones u ondas. Desde el punto de vista corpuscular, la radiación solar consiste en un flujo de paquetes de energía, denominados «cuantos» o «fotones», que se propagan en forma ondulatoria. Para describir la radiación, normalmente se recurre a la definición de las características de las ondas que la componen, siendo uno de los parámetros más utilizados la longitud de onda (λ).

El conjunto de los diversos tipos de radiación que componen la radiación solar, organizados en función de sus longitudes de onda, es lo que se conoce como espectro electromagnético de la radiación solar. Incluye un intervalo de longitudes de onda entre 100 y 5.000 nm., en el cual, sólo una estrecha banda comprendida entre 380 y 760 nm. resulta visible para el hombre (espectro visible). La luz es, pues, energía radiante con capacidad para producir sensaciones visuales y el color es únicamente una apreciación, por parte del ojo humano, de las características de las ondas que emite un determinado objeto.

La energía que proporciona una determinada radiación está ligada matemáticamente a su longitud de onda, según:

$$E = h.c/\lambda$$

Donde h es la constante de Planck, y c es la velocidad con que la radiación solar se propaga en el vacío.

De acuerdo con la relación anterior, las radiaciones de longitud de onda más larga, son menos energéticas que las de lon-

gitud de onda más corta. Ciñéndonos al espectro visible, esto se traduce en que la zona más energética es la que corresponde al violeta (390-430 nm), y la zona menos energética, la que corresponde al rojo (650-700 nm). Esto es interesante, por ejemplo, en cámaras de crecimiento y sistemas de apoyo luminoso.

La distribución espectral de la radiación solar está sometida a numerosos factores de variación como son:

- La masa de aire que atraviesa; este factor hace que al amanecer, o al nivel del mar, exista una gran atenuación de las radiaciones de longitud corta (violeta, azul); la luz entonces tiene más proporción de la zona roja. Este efecto va disminuyendo conforme el sol va adquiriendo la posición cenital, o con el aumento de la altitud.

- La elevación del sol, que a su vez depende de la estación del año y hora del día. La relación rojo/infrarrojo es máxima a mediodía, y mínima al anochecer y amanecer; a su vez, en verano hay más proporción de infrarrojo que en invierno.

Medida de la radiación solar.

La determinación de la cantidad de radiación solar que recibe una superficie en un período de tiempo, puede realizarse según tres posibles enfoques: energético, fotométrico y cuantométrico.

I. Energético. Se expresan las medidas en términos de energía radiante por unidad de superficie y de tiempo. Los instrumentos utilizados se denominan Piranómetros, de gran aplicación en observaciones meteorológicas y balances energéticos. Unidad: Julio/metro cuadrado/segundo ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).

II. Fotométrico. El enfoque fotométrico hace referencia a la radiación visible en relación a la sensación que produce en el ojo humano. Los instrumentos utilizados en este caso se denominan Fotómetros o Luxómetros, que son de amplio uso en luminotecnia. Unidad: lux (lx) (=lumen/metro cuadrado) ($lm \cdot m^{-2}$). Nota: 1 lumen = flujo luminoso emitido en un estereoradián por un manantial luminoso uniforme y puntual, de intensidad igual a una candela, situado en el vértice del ángulo sólido.

III. Cuantométrico. Se expresan las medidas en términos de flujo de cuantos o fotones. Los instrumentos utilizados son los Cuantomómetros, especialmente empleados en fotoquímica. Unidad: microeinstein/metro cuadrado/segundo ($\mu e \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Nota: 1 einstein = 1 mol de fotones = $6,023 \cdot 10^{23}$ fotones.

En las relaciones de la radiación solar con las plantas, es más adecuado expresarse en términos de cuantos o fotones, debido a que la fotosíntesis es un complejo proceso de tipo fotoquímico en el que las reacciones se suceden por absorción de fotones.

La radiación útil a las plantas.

La radiación solar, al atravesar la atmós-

fera, sufre un conjunto de atenuaciones que hacen que la radiación que llega a las plantas, Radiación Global Incidente, no coincida con la que originalmente llegó a la atmósfera. Como causas principales, pueden citarse:

- La absorción de la radiación ultravioleta por la capa de ozono.

- La dispersión causada por moléculas de menor tamaño que la longitud de onda de la radiación incidente.

- La dispersión debida a aerosoles y partículas en suspensión.

- La absorción por las nubes y oxígeno.

De esta Radiación Global Incidente (Rg), y debido a las peculiaridades de los pigmentos encargados de la captación de la radiación, sólo una proporción es útil para la fotosíntesis; es lo que se denomina Radiación Fotosintéticamente Activa, o PAR. Corresponde a aquella parte del espectro comprendido entre las longitudes de onda de 400-700 nm que, aproximadamente, viene a ser el 45% de la Radiación Global Incidente en las plantas.

BALANCE DE RADIACION

Componentes del balance de radiación.

La cantidad de energía que se utiliza en la fotosíntesis (radiación PAR absorbida) puede calcularse a partir del balance de radiación como la energía que entra en la cubierta vegetal menos la energía que sale de la misma. La energía que entra proviene fundamentalmente de la radiación PAR solar incidente (PAR_i) y de una pequeña cantidad de radiación PAR que refleja el suelo hacia las plantas (PAR_{ts}). La radiación que refleja la cubierta vegetal (PAR_r) y la que se transmite al suelo (PAR_t) salen sin ser aprovechadas por los órganos verdes de las plantas (véase Figura 2).

El balance de radiación queda, pues, de la siguiente forma:

$$PAR_a = (PAR_i + PAR_{ts}) - (PAR_r + PAR_t)$$

En la práctica, en muchas ocasiones, al hacer estudios de radiación sobre cubiertas vegetales, el balance se simplifica al considerarse sólo los términos más relevantes del mismo: radiación incidente y radiación transmitida al suelo. En este caso, se habla de radiación interceptada (PAR_{int}):

$$PAR_{int} = PAR_i - PAR_t$$

El término radiación interceptada, de uso más común que el de radiación absorbida, en ocasiones se aplica indistintamente tanto para la radiación interceptada propiamente dicha, como para la absorbida.

La medida experimental de los distintos componentes de este balance se puede realizar utilizando sensores de radiación, que pueden ser de varios tipos; sensores que miden directamente la radiación foto-

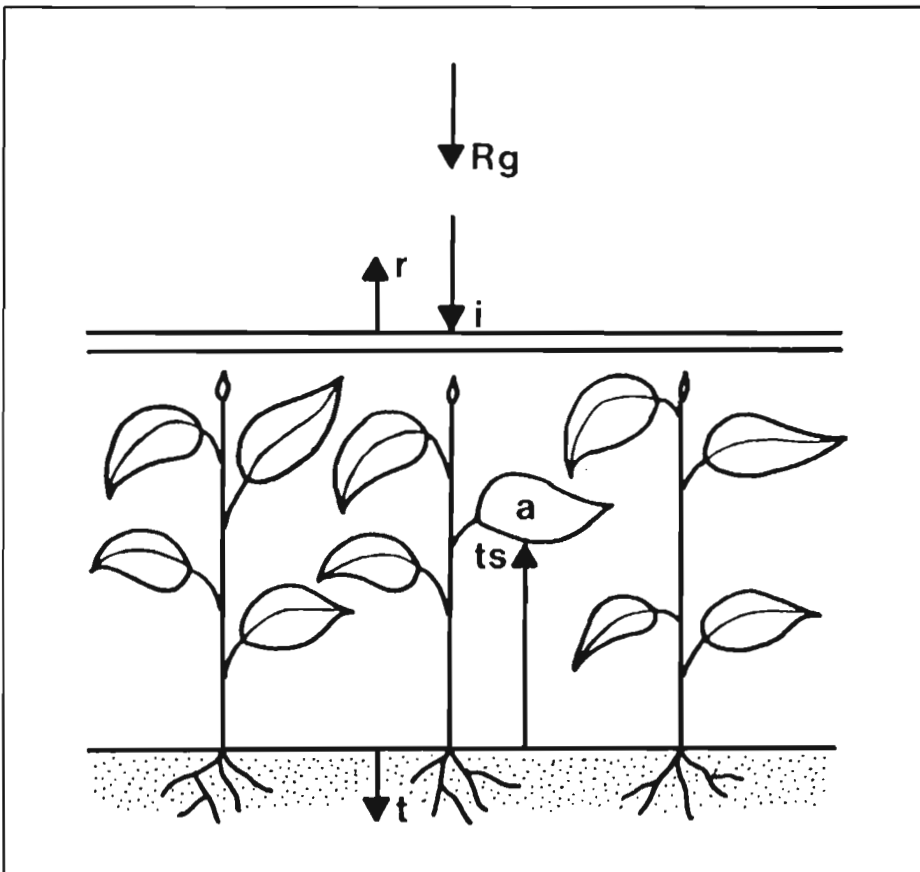


FIGURA 2: Balance de radiación en una cubierta vegetal.
Rg, radiación solar global incidente.
i, radiación PAR incidente en la cubierta.
r, radiación PAR reflejada por la cubierta.
a, radiación PAR absorbida por la cubierta.
ts, radiación PAR reflejada por el suelo, que resulta absorbida por la cubierta.
t, radiación PAR transmitida al suelo.

O un suelo desnudo, y el valor 1, una cubierta vegetal que no dejase pasar radiación alguna a su través.

Al igual que ocurre con la radiación interceptada, la radiación absorbida se puede relacionar con la incidente mediante la eficiencia de la absorción E_a , que generalmente es muy similar a E_i .

La eficiencia de absorción o de interceptación depende de numerosos factores, como son la arquitectura particular de las plantas, las características de la cubierta vegetal (ceras, indumento, tipos de clorofila, ...) y, en especial, de la cantidad de hojas y tejidos verdes que hay en la cubierta vegetal.

Para expresar numéricamente el anterior concepto, se recurre al denominado Índice de Área Foliar (LAI), índice que expresa el grado de «hojiosidad» de una determinada cubierta vegetal:

$LAI = \text{superficie foliar (hojas verdes) / superficie de terreno ocupado.}$

A medida que aumenta el número y el tamaño de las hojas de un cultivo, es decir, a medida que aumenta el LAI, la eficiencia de interceptación se incrementa progresivamente, según una función (véase Figura 5) del tipo:

$$E_i = E_{imas} (1 - e^{-k \cdot LAI})$$

A partir de un cierto valor de LAI, variable según los cultivos y las condiciones ambientales, prácticamente no se incrementa la interceptación de la luz, porque se ha llegado a una interceptación máxima (generalmente del orden del 95% de la radiación incidente). Un desarrollo de nuevas hojas por encima de este valor de LAI no será, pues, beneficioso para el rendimiento de un cultivo — cuyo valor económico no sean las hojas — ya que existirá un mate-

sintéticamente activa (PAR), y sensores que miden la radiación global (Figura 3). En este último caso es necesario hacer una corrección para pasar a radiación PAR. Para ello, basta multiplicar la radiación global incidente por un factor empírico; en cambio, para estimar la radiación transmitida, hay que aplicar fórmulas más complicadas que dependen del tipo de cultivo que se trate.

La medida de la radiación transmitida es siempre la más problemática debido a la heterogeneidad con que pasa de la radiación a través de la cubierta vegetal, y debe realizarse en sensores de tipo lineal que abarquen una superficie representativa (Véase Figura 4).

Eficiencia de la interceptación. Índice de Área Foliar.

A partir del balance de radiación, según un sencillo procedimiento matemático, se calcula la radiación interceptada en función de la radiación incidente según:

$$PAR_{int} = E_i \times PAR_i$$

En donde E_i se denomina eficiencia de la interceptación de la cubierta vegetal. E_i varía entre 0 y 1, representando el valor



FIGURA 3: Sensor puntual de radiación solar global.
(Equipo perteneciente a la Unidad Docente de Botánica Agrícola de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid).

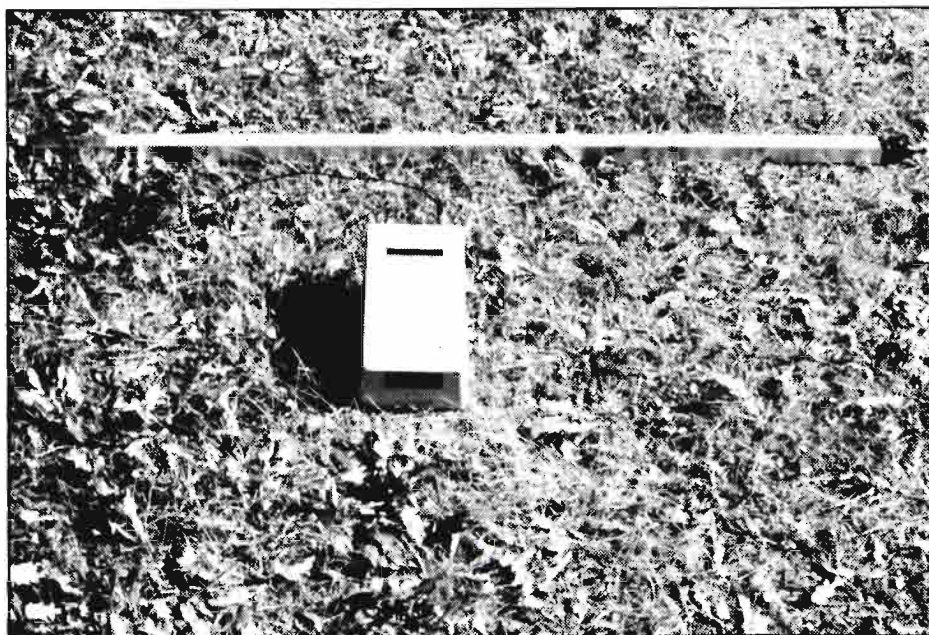


FIGURA 4: Sensor lineal para medida de radiación PAR transmitida y sistema de almacenamiento de datos «DATA LOGGER». (Equipo perteneciente a la Unidad Docente de Botánica Agrícola de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid).

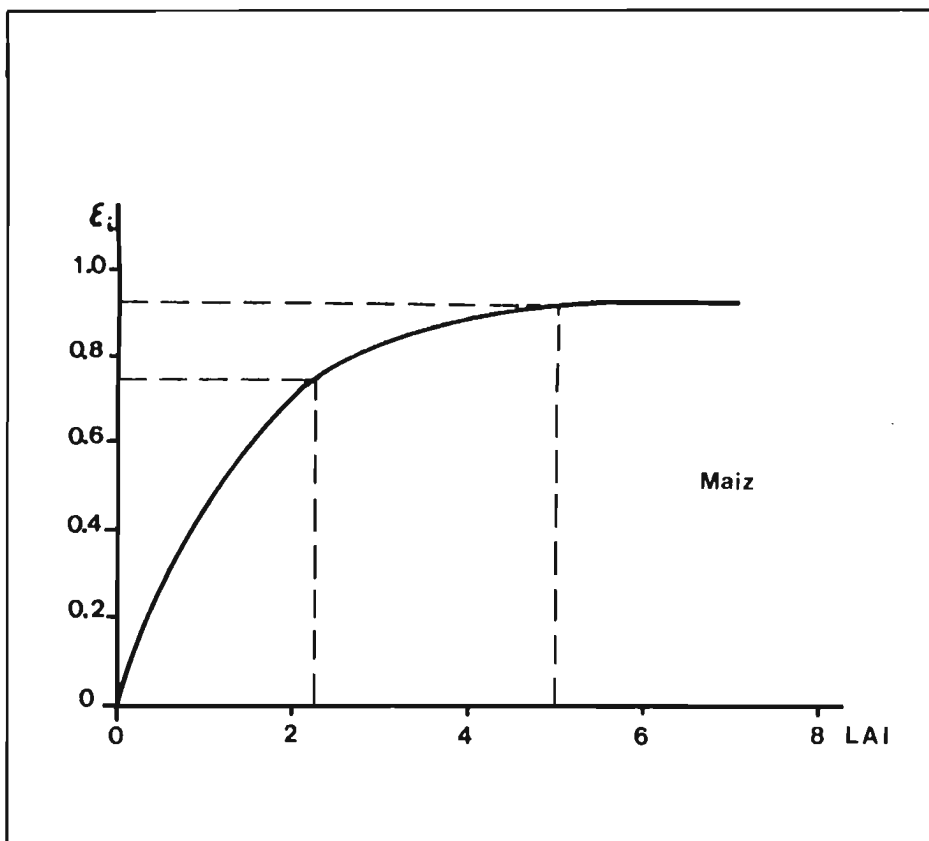


FIGURA 5: Eficiencia de intercepción (E_i) de la radiación solar en función del Índice de Área Foliar (LAI).
Cubierta vegetal: maíz c.v. BIP, en el Norte de Francia.
Función: $E_i = 0,95 (1 - e^{-0,7 \cdot LAI})$.
(Según GOOSE et al., 1986).

rial fotosintético que no produce por falta de luz, y, que, además, está consumiendo reservas por respiración.

El incremento de la producción vegetal a través de la utilización del LAI.

Los métodos más tangibles y divulgados para incrementar la productividad de un determinado cultivo son los referentes a elección adecuada de variedades cultivadas (= cultivares), ciclo de cultivo aconsejado, fertilización, sanidad del cultivo y riego. El método que aquí se va a destacar, en clara relación con lo anteriormente expuesto, es el de la utilización del LAI.

La utilización del LAI es sencilla, y se traduce en una práctica agrícola común: elección del marco de plantación o de la densidad de siembra.

Con densidades de siembra altas, se consigue enseguida una cubierta vegetal espesa, que interceptará una mayor proporción de la radiación solar incidente por unidad de superficie. Si es demasiado alta, puede ocurrir que exista competencia por la luz entre las plantas por haber llegado a la eficiencia de absorción o intercepción máxima y que, por tanto, no se traduzca el incremento en LAI en el esperado incremento en producción. También puede ocurrir que los nutrientes y el agua lleguen a ser limitantes para el cultivo, si su disponibilidad no es abundante.

Con densidades de siembra bajas, el LAI tomará valores bajos, con lo que la eficiencia de absorción o intercepción ofrecerá también valores bajos. Es decir, la proporción de radiación solar por unidad de superficie de terreno que llegan a interceptar las hojas será baja. La producción por unidad de superficie será menor que en el caso anterior pero, si los recursos en nutrientes y agua son escasos, podría ser una medida conveniente.

Mediante la investigación experimental se establecen las densidades de siembra óptimas para cada cultivo, clima y zona. Pero corresponde al agricultor, conocedor de los recursos de que dispone, el evaluar si éstos pueden ser escasos, y si conviene reducir la densidad de siembra para obviar los problemas de competencia, o aumentarla, a fin de una mayor producción vegetal.

ESTIMACION DE LA PRODUCCION POTENCIAL DE UN CULTIVO

Según lo anterior, la producción final de un determinado cultivo o especie vegetal, es una función de su actividad fotosintetizadora en el período de tiempo en que se desarrolla, suponiendo que otros factores no sean limitantes ni condicionantes (plagas, enfermedades, disponibilidades hídricas, elementos minerales...).

En definitiva, la producción vegetal es una función de la cantidad de radiación solar absorbida, que depende, según se ex-

AGRICULTURA MODERNA

puso, de la radiación solar incidente y de la eficiencia de absorción.

$$MS = f(PARa) = f(PARi, Ea)$$

Donde MS es la materia seca total producida en el período de tiempo considerado.

Diversos autores han establecido, para distintas especies, la existencia de una relación de tipo lineal entre la materia seca total acumulada por la cubierta vegetal y la cantidad de radiación absorbida o interceptada. GOOSE et al., a partir de datos de diversa procedencia, llegaron a establecer tres rectas de producción potencial para tres grandes tipos de plantas, las C₄, las C₃ no leguminosas y las C₃ leguminosas, confirmando estas apreciaciones la superioridad productiva de las plantas C₄ (Véase Figura 6).

A partir de los datos de radiación solar de una zona en concreto, disponibles en muchas estaciones del Servicio Meteorológico Nacional, se puede estimar de forma muy sencilla la radiación PAR absorbida o interceptada por el cultivo, considerándose una eficiencia de absorción o interceptación máxima —es decir, no considerándose los períodos iniciales del cultivo ni el período de senescencia de las hojas—. La producción potencial del cultivo podría estimarse entonces, introduciendo el valor de PAR absorbida o interceptada en las correspondientes rectas de regresión, previamente determinadas en la bibliografía.

Comparando los resultados obtenidos de producción potencial con producción real podríamos conocer a qué nivel de optimización de la producción estamos. Se podría, incluso, llegar a rechazar la introducción de un nuevo cultivo en una zona, por preverse producciones antirrentables, en base a los valores medios acumulados de radiación solar.

BIBLIOGRAFIA

CARLSON, P.S. (Ed.) (1980). The biology of crop productivity. Academic Press. New York. 471 pp.

GOOSE, G. et al. (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. Agronome 6 (1): 47-56.

LANGER, R.H.M.; HILL, G.D. (1987). Plantas de interés agrícola. Acribia. Zaragoza. 386 pp.

VICENTE, C.; LEGAZ, M.E. (1984). Fito-física ambiental. Pirámide. Madrid. 213 pp.

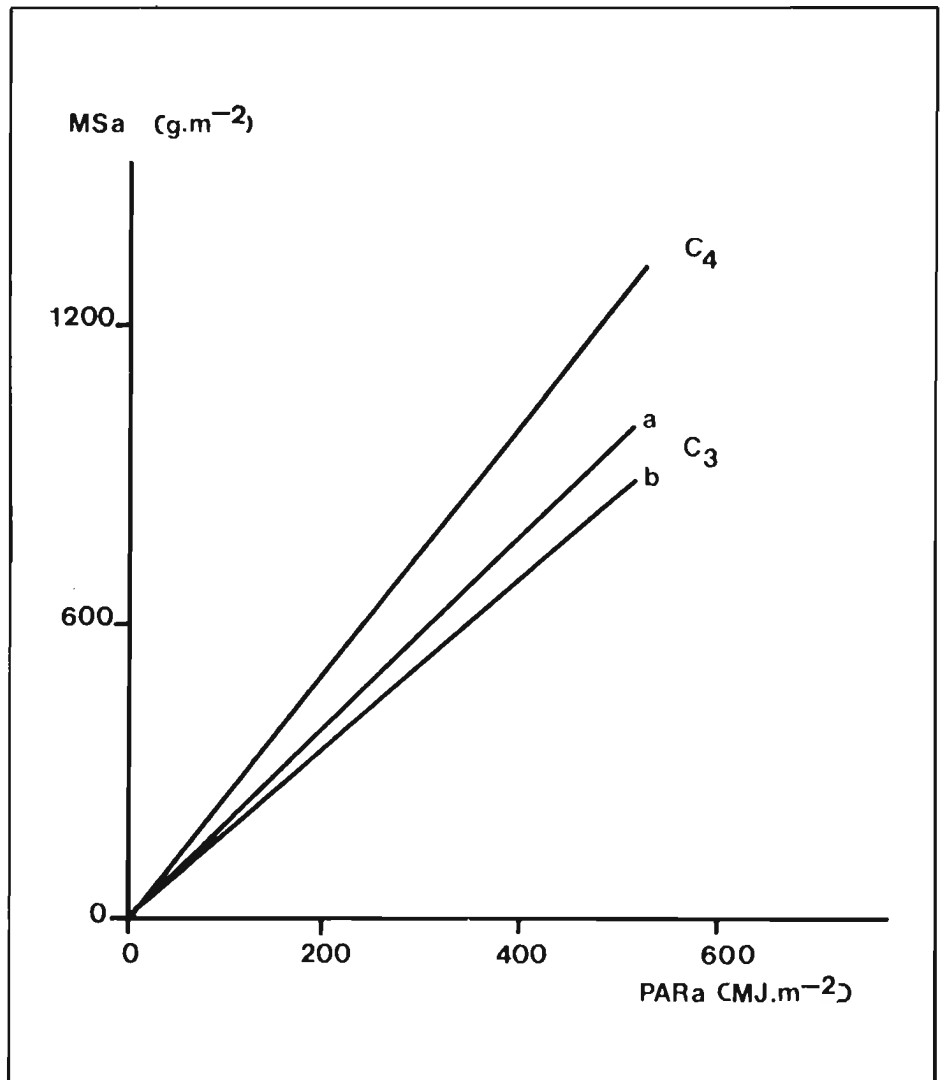


FIGURA 6: Productividad potencial, expresada en materia seca aérea (MSa), en función de la cantidad acumulada de radiación PAR absorbida (PARa), para cultivos de tipo metabólico C₃ (a: no leguminosas; b: leguminosas) y C₄. (Según recopilación de GOOSE et al., 1986).

