

ASPECTOS FISIOLÓGICOS DE LA PRODUCTIVIDAD VEGETAL¹

Antonio Roberto Pereira²

La fotosíntesis es el proceso fisiológico responsable de la captación de energía solar y su subsecuente transformación bioquímica en compuestos orgánicos que a la vez son transformados en alimentos, fibras, celulosa y energía. El proceso de oxidación de compuestos orgánicos para liberar la energía necesaria para el mantenimiento y crecimiento de las plantas se denomina respiración.

Conceptualmente fotosíntesis y respiración son procesos antagónicos, donde el primero representa ganancia y el segundo pérdida de energía. Esta visión fisiológica distorsionada es el resultado de la filosofía reduccionista que dominó la ciencia desde el siglo XVII. El reduccionismo indujo al estudio detallado de estos dos procesos diferentes, permitiendo grandes avances hasta un nivel molecular; sin embargo, todo proceso fisiológico solo se justifica dentro de un contexto mayor, como parte de un sistema. Para tener una visión amplia y panorámica del sistema, es necesario el desarrollo de modelos integrados de los dos procesos y sus interacciones. Desde este punto de vista, fotosíntesis y respiración pueden ser analizadas como componentes de un sistema autotrófico productivo.

Partiendo del supuesto que el producto de la fotosíntesis puede ser utilizado en el mismo día, McCree (1970), experimentalmente, y Thornley (1970) teóricamente, desarrollaron un modelo que permite cuantificar su utilización y distribución. La Cantidad total de sustrato (s)

producido por la fotosíntesis bruta (Fb), en un intervalo de tiempo (t), está dada por,

$$s = Fb \cdot t \quad (1)$$

Teóricamente, s puede ser utilizado en dos procesos, crecimiento (Sc) y mantenimiento (Sm), esto es,

$$s = sc + sm \quad (2)$$

Crecimiento significa la incorporación de nueva fitomasa; mantenimiento es un proceso de reposición de compuestos degradados, de conservación de los gradientes electroquímicos de las membranas, en fin un proceso de recomposición de las células que no resulta en un incremento de fitomasa (Penning de Vries, 1975 a,b). Sm es totalmente respirado, respiración de mantenimiento, siendo proporcional a la fitomasa existente (W), o sea,

$$Sm = M \cdot W \cdot t \quad (3)$$

Donde M es el coeficiente de respiración de mantenimiento. La ecuación (3) demuestra que cuando mayor es la planta, mayor es su respiración de mantenimiento. Sin embargo, esta no es la única forma de respiración, pues parte de Sc también es respirada (Sr), denominándose ésta respiración de síntesis, liberando energía para convertir lo restante en nueva fitomasa (W). Por lo tanto,

1 Extraído de la Revista Brasileña de Fisiología Vegetal, 1(2): 139-42, 1989.

2 Ing. Agr., Ph D., Investigador Científico VI, Sección de Climatología Agrícola y Centro de Computación, Instituto Agronómico, Campiñas.

$$S = W + Sr + Sm \quad (4)$$

La eficiencia (Y) del proceso de conversión fotosintética está dada por la relación entre el incremento de la fitomasa (W) y la cantidad de sustrato disponible para el crecimiento (Sc), esto es,

$$Y = W/Sc = W/(W + Sr) \quad (5)$$

Substituyendo las ecuaciones (1) y (5) en la ecuación (4), y simplificando la misma tenemos,

$$W/t = Y (Fb - M \cdot W) \quad (6)$$

Donde W/t representa la tasa de crecimiento en la planta. Por lo tanto, la tasa de crecimiento resulta del balance entre la tasa de fotosíntesis y la tasa de respiración de mantenimiento. La ecuación (6) permite cuantificar las interacciones entre crecimiento, fotosíntesis y respiración.

La tasa de fotosíntesis varía mucho entre plantas con metabolismo tipo C4, C3 y CAM de fijación de CO₂ atmosférico. Las plantas tipo C4 son las más eficientes fotosintéticamente y dentro de éstas se destacan maíz, caña de azúcar y sorgo. Las plantas tipo C3 son menos eficientes e incluyen arroz, fréjol, trigo, soya, algodón, maní, patata y mandioca. Entre las de tipo CAM está el aguacate.

Dentro de plantas de una misma especie la tasa de fotosíntesis varía con el cultivo. Sin embargo no hay evidencia experimental de la existencia de una relación positiva entre productividad y tasa de fotosíntesis, ni que seleccionando plantas de mayor tasa de fotosíntesis se tenga mayor productividad (Evans, 1975; Elmore, 1980).

El hecho paradójico de que no exista una correlación entre productividad y tasa de fotosíntesis puede ser aclarado a través de un análisis cuantitativo de crecimiento (índice de rendimiento) y de eficiencia de conversión (Y). En cereales el aumento de productividad resultó de la selección de plantas menos competitivas (Jennings y Aquino, 1968; Donald, 1968), pero con mayor capacidad de localización de productos fotosintéticos en los granos (Donald, 1962; Donald Hamblin, 1976; Duncan et al., 1978; Borlaug, 1983; Snyder y Carlson, 1984; Neyra, 1985). En arroz, Jennings y Jesús (1968) encontraron una relación negativa entre productividad y competitividad, lo cual implica que plantas más competitivas presentaron mayor producción de tallos y hojas y menor de granos; por lo tanto, presentan menor índice de rendimiento. El control de malas hierbas elimina la necesidad de seleccionar plantas altas, con hojas largas y competitivas, permitiendo la selección de plantas que localicen mayor proporción de sus reservas en órganos de importancia económica (Evans, 1975).

Por lo tanto esta tasa de fotosíntesis acarrea una tasa de crecimiento inversamente proporcional al tamaño de la planta, en función de la respiración de mantenimiento. Esto explica en parte la mayor productividad de variedades de tamaño reducido, principalmente en cereales. El valor de M varía principalmente con la temperatura (McCrece, 1970) y con la edad de la planta (Hunt y Loomis, 1970). Cuando mayor es la temperatura, mayor es la actividad metabólica de los tejidos y consecuentemente, mayor la degradación de células; por lo tanto, M aumenta con el aumento de temperatura. La actividad metabólica disminuye con la edad de los tejidos, provocando decrecimiento en el valor de M. Plantas más viejas necesitan, proporcionalmente, menor cantidad de carbohidratos para su mantenimiento.

La eficiencia de conversión (Y) tiene como fuente principal de variación la composición de la fitomasa formada (Penning de Vries, 1975; Penning de Vries et al., 1983). La composición de la fitomasa varía con la especie y también con el cultivar. Basicamente, cinco grupos de sustancias se encuentran en las plantas: carbohidratos, proteínas, lípidos, lignina y ácidos orgánicos. Sin embargo el producto primario de la fotosíntesis son los carbohidratos y su conversión a otros compuestos orgánicos representa un costo energético equivalente a la respiración de síntesis (Sr). De modo general, de un gramo de carbohidrato fotosintetizado resultan (1) 0,404 g de proteínas; (2) 0,33 g de lípidos (3) 0,472 g de lignina; (4) 0,826 g de carbohidratos estructurales; (5) 1,104 g de ácidos orgánicos (Penning de Vries et al., 1983).

Así resulta más claro entender porqué cuando se selecciona plantas para tener un aumento en el valor del contenido de proteína o grasa el proceso esta siempre acompañado de reducción en la productividad, debido a que estos compuestos (proteína) son altamente energéticos, con un alto costo de respiración de síntesis y un bajo coeficiente de conversión. La tabla 1 presenta la composición media y la eficiencia de conversión de algunos cultivos. La composición de algunos cultivos puede diferir sustancialmente de los valores medios presentados. Sin embargo estos datos permiten comparaciones entre las especies citadas. Cabe resaltar que Y decrece con el decrecimiento en el contenido de carbohidratos. En forma relativa 1 tonelada de caña de azúcar o de mandioca equivale a 0.86 toneladas de fréjol.

La tabla 2 muestra que los rendimientos obtenidos en condiciones naturales clasifican a los diversos cultivos de acuerdo con su producción potencial. Solamente para el cultivo de fréjol, debido a algunos problemas económicos de manejo y de sensibilidad a estrés, la productividad obtenida no corresponde a la esperada. Teóricamente, la productividad de fréjol debería ser mayor que a aquellas de soya y

de maní.

Otro aspecto que se destaca es que tanto la media mayor como la media mundial son bastante menores a la máxima productividad registrada. Considerando a la media mayor como la más cercana a la realidad, se observa que la media

mundial varía en un 25%, en el caso del fréjol y 44% en el caso de la soya; de modo general, la media mundial se sitúa alrededor del 30% con respecto a la media mayor observada. Nótese también que las mayores productividades medias no siempre fueron obtenidas en países tecnológicamente más desarrollados.

Tabla 1. Composición media y eficiencia de conversión (Y) de algunos cultivos¹.

Cultivo	Organo	Composición(% Materia Seca)					Y
		Carb.	Prot.	Lip.	Lig.	Ac. Org.	
Caña de azúcar ²	Tallo	88	2	1	7	1	0,78
Mandioca	Tubérculo	87	3	1	3	3	0,78
Camote	Tubérculo	84	5	2	3	3	0,76
Papa	Tubérculo	78	9	0	3	5	0,75
Maíz	Espiga (sem-70%)	75	8	4	11	1	0,73
Arroz	Panícula (graos-60%)	76	8	2	12	1	0,73
Trigo	Panícula (graos-85%)	76	12	2	6	2	0,73
Fréjol	Vaina (sem-85%)	60	23	2	7	4	0,67
Girasol	Inflorescencia (sem-44%)	45	14	22	13	3	0,60
Algodón	Capullo (sem-65%;lint-35%)	40	21	23	8	4	0,57
Soya	Vaina (sem-80%)	29	37	18	6	5	0,53
Maní	Vaina (sem-75%)	14	27	39	14	3	0,45

Fuente: 1 Penning de Vries et al. (1983)

2 Valsechi y Oliviera (1964)

Tabla 2. Productividad de algunos cultivos¹

Cultivo	PRODUCTIVIDAD (t/ha)					
	Máx. Reg.(1)	Mayor Media(2)	Media Mundial(3)	(2)/(1)	(3)/(1)	(3)/(2)
Maíz	23.2	7.5 N.Zelandia	3.0	0.32	0.12	0.40
Arroz	17.8	7.0 Gabón	2.5	0.39	0.14	0.36
Trigo	12.0	5.7 Holanda	1.8	0.48	0.15	0.32
Soya	7.4	3.4 Italia	1.5	0.46	0.20	0.44
Maní	5.0	3.8 Malasia	1.0	0.76	0.20	0.26
Fréjol	5.0	2.4 Egipto	0.6	0.48	0.12	0.25

Fuente: 1 Tanaka (1983)