



¿Los organismos vivos son eficientes?

*E. R. L. Loustau y **J.A. del Río P.

* Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), A. P.34, CP.62580 Temixco, Morelos, México. ** Centro de Ciencias de la Complejidad (UNAM), A. P.70472, CP.04510, D.F., México.

En estos días se puede escuchar en las discusiones sobre la problemática ecológica frases estableciendo que deberíamos regresar a la eficiente convivencia con lo natural que tenía la humanidad en tiempos prehistóricos. Esta forma de pensar ejemplifica el prejuicio que considera que los seres vivos, viven en armonía con su entorno y que por ende la humanidad en el pasado también lo hacía.

Por otro lado, el supuesto de que los organismos vivos son eficientes nos inclina a pensar que manejan sus recursos de forma óptima, dando lugar a otro prejuicio que en la actualidad circulan entre muchos grupos sociales. Esto no implica que la idea de mimetizar los diseños y procesos biológicos en la tecnología de punta sea inadecuada. Es más, algunos autores de la década de los 90s decidieron llegar más lejos, y propusieron a la “eficiencia” como criterio evolutivo de las especies[1].

La idea de que una cantidad física como la eficiencia pueda dirigir las interacciones organismo entorno o su evolución, es muy atractiva, pero también arriesgada. La definición de eficiencia de un sistema físico es muy clara: la razón entre la energía usada por el sistema para hacer el trabajo requerido y toda la energía que entró al sistema menos la que salió en ese proceso. ¿Se pueda usar esta definición para cuantificar la eficiencia de cualquier organismo vivo? A esta pregunta pretende dar respuesta este trabajo.

La admiración que los diseños y procesos naturales nos merecen, probablemente alimenten también un prejuicio recurrente: El de pensar que todos los or-

ganismos vivos son “eficientes”, es más, algunas personas piensan que son la epítome de la “eficiencia”. Ejemplo de este prejuicio, es el artículo de Milewski et al. publicado el año pasado en una revista importante en el ámbito biológico [2]. En ese trabajo los autores definen una cantidad E, a la que nombran intensidad energética, como la tasa promedio de energía usada por el organismo por unidad de área de la superficie terrestre. Establecen que E sólo incluye la energía cinética usada por el organismo y no la térmica. En ese artículo se dice que los individuos de las especies dominantes son aquellos con E máxima. Además se afirma que los organismos vivos son eficientes, puesto que sus sistemas minimizan las disipaciones energéticas; y que la energía que estos sistemas disipan en forma de calor, puede ser recuperada por ellos mismos en forma de fotones. Esta última afirmación nos llamó la atención.

Intrigados por las generalizaciones de Milewski y colaboradores, decidimos estudiar si las plantas reutilizan la energía térmica de su entorno para su fotosíntesis. Entonces, analizamos si los pigmentos fotosintéticos tienen la capacidad de absorber la radiación que un cuerpo a temperatura ambiente emite y de utilizarla en su fotosíntesis. Para ello requerimos revisar varios procesos como la fotosíntesis y de conceptos de física como el de radiación de cuerpo negro.

Recordemos que la fotosíntesis puede darse en ambientes con oxígeno (plantas y cianobacterias) o sin él (bacteria púrpura), los ingredientes importantes para el proceso son el H₂O y el CO₂ que se disocian



para liberar O_2 y construir moléculas de ATP (Adenosin Trifosfato), entre muchas otras. Los organismos fotosintéticos fijan nutrientes en la biósfera utilizando la energía luminosa que absorben para convertir materia inorgánica a orgánica [3]. El fascinante proceso de la fotosíntesis consiste de 3 etapas básicas: La absorción de los fotones por parte de los pigmentos fotosintéticos, la separación de las cargas eléctricas y la reducción de tanto el H_2O como del CO_2 usando el potencial químico generado. La separación de las cargas y la reducción del CO_2 se efectúa en estructuras llamadas centros de reacción (RC). Los pigmentos y los RC se ubican en las membranas de los tilacoides, que son pequeñas estructuras contenidas por los cloroplastos [4].

Desde la época de Aristóteles y hasta nuestros días, la fotosíntesis ha despertado la curiosidad de la humanidad y a finales del siglo pasado fue una inspiración para el diseño de celdas fotovoltaicas inorgánicas y orgánicas. Recientemente, la simulación computacional ha permitido determinar con precisión propiedades físicas de los pigmentos fotosintéticos como: su tamaño, estructura, orientación, ubicación respecto al RC, espectro de absorción, etc. [5]. En particular, el espectro de absorción de los pigmentos fotosintéticos, nos indica cuales longitudes de onda de la radiación electromagnética incidente absorben.

A simple vista las plantas parecen verdes debido a que la clorofila es el pigmento más abundante en sus cloroplastos y que NO absorbe fotones “verdes”, sino fotones en los extremos del espectro electromagnético visible, azul y rojo. Sin embargo, los cloroplastos vegetales también contienen en menor cantidad pigmentos (auxiliares) llamados carotenoides, que no absorben fotones de color amarillo-naranja y por lo tanto se ven de ese color. La presencia de los carotenoides alrededor del RC se presume que responde, a que no sólo participan en el proceso de transferencia de carga hacia el RC, sino que previenen daños por un exceso de radicales O_2 [4]. Se ha encontrado

que las plantas no pueden transformar todos los fotones que inciden sobre ellas en energía química, sino que tienen un umbral de saturación, es decir, pueden transformar toda la radiación de un día nublado, pero al medio día con un cielo despejado sólo aprovechan parte de la radiación [6]. Esta situación de saturación implica que hay fotones que llegan a la planta y ya no siguen el proceso completo de absorción y su posterior uso en la separación de la carga eléctrica para producir ATP. El exceso de energía absorbida se suele disipar en forma de calor por los pigmentos auxiliares, que según Milewski puede ser reutilizada incrementando la eficiencia de este proceso. Este es un punto importante, las plantas no pueden absorber toda la radiación que llega y transformarla en carga eléctrica, se saturan, se calientan, es decir no tienen eficiencia máxima, pero analicemos si pueden absorber esa energía radiante de temperatura ambiente.

De aquí la importancia del analizar la capacidad de absorción de la radiación que es disipada en forma de energía térmica por los pigmentos vegetales. Consideremos que los pigmentos están a la misma temperatura que el medio ambiente, por ejemplo $27\text{ }^\circ\text{C}$ (aprox. 300 K), ya que la planta se encuentra en equilibrio térmico con el medio. Si los pigmentos pueden absorber la radiación “térmica” del medio, entonces la posibilidad de que la inviertan en la fotosíntesis es alta, y la eficiencia de estos organismos fotosintéticos será mayor que la de aquellos organismos en los que sus pigmentos no la reutilicen.

Es aquí donde necesitamos conceptos de física que nos aclaren qué es la radiación solar o la radiación de un cuerpo a temperatura ambiente. Para este análisis recordaremos un concepto muy útil que es el del cuerpo negro. Este concepto físico se refiere a un cuerpo ideal que absorbe y emite toda la radiación posible de acuerdo a su temperatura. Recordemos que objetos muy calientes empiezan a emitir luz, primero se ponen rojos y conforme se calientan más se ponen

amarillos y luego azules. Por el contrario si los enfriamos pasan de ser rojos a ser negros, aunque al acercar nuestra piel a ellos podemos “sentir calor” una plancha es oscura, pero sentimos la radiación. Es decir un cuerpo negro está emitiendo radiación electromagnética en un rango no visible, lo vemos negro. La radiación del cuerpo negro obedece tres leyes: Stefan-Boltzmann, la de Planck y la de Wien. La ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la intensidad de la energía emitida (J) por un cuerpo negro a una temperatura (T) están relacionadas como: $J = \sigma T^4$, donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, es decir mientras más caliente esté un cuerpo más energía emitirá. Si tenemos a un cuerpo con el doble de temperatura que otro, el más caliente emitirá 16 veces más radiación que el frío. La ley de Planck nos indica la distribución de longitudes de onda de los fotones emitidos por un cuerpo negro a una temperatura determinada, es decir el “color” de la radiación emitida por un cuerpo depende de su temperatura. Por ejemplo, veamos la figura 1 donde se ilustra la distribución de Planck. En esta figura 1 se están graficando las intensidades de energía que se emiten a cada longitud de onda de acuerdo con la Ley de Planck. En el caso

del Sol (línea continua) se observa una magnitud muy grande digamos de 10 mil en cambio en el cuerpo a temperatura ambiente (línea cortada) la magnitud es de 0.35, esto ya es una diferencia, pero además podemos notar que la longitud de onda máxima del espectro solar es del orden de 500 nm, mientras que para el cuerpo a temperatura ambiente es de 10mil nm=10 micras. Si bien la forma de la curva es similar los valores de estas curvas son totalmente diferentes. Además si vemos que la región del visible está entre 380 y 700 nm entendemos por qué no vemos la radiación de los cuerpos a temperatura ambiente y solamente vemos la luz que reflejan. Hemos puesto un dibujo de colores para señalar la región del espectro visible (figura 1). Como vemos la mayor área bajo la curva de la distribución de Planck se encuentra en esta región. También hemos puesto una línea vertical (roja) que indica la longitud de onda de los controles remotos de las televisión, radiación infraroja que tampoco vemos. Por último, la ley de Wien nos permite determinar el máximo de la distribución de Planck, dicho de otra forma, nos indica la longitud de onda de los fotones que un cuerpo a una temperatura dada emite en mayor cantidad [7].

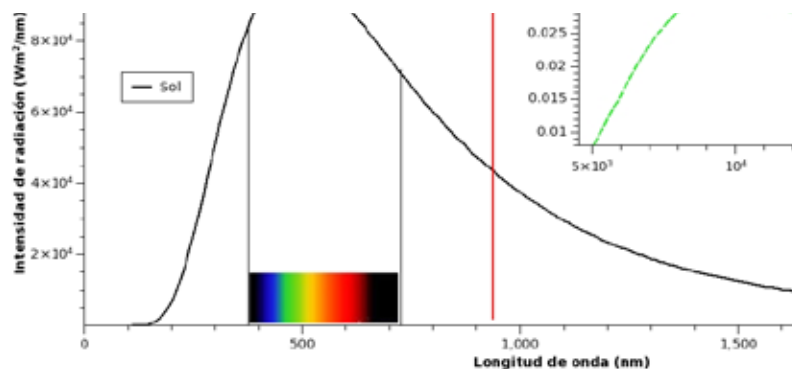


Figura 1. Se muestran los espectros de radiación de cuerpo negro para dos temperaturas 6000K (continua) y 300K (quebrada)



Ahora con esta información regresemos a analizar el caso de la fotosíntesis. Se ha encontrado que la clorofila tiene regiones de absorción en los intervalos de 400 a 500 nm y 600 a 700 nm, los carotenoides absorben de 400 a 550 nm [6]. El espectro visible abarca de 380 a 700 nm, por lo que estos pigmentos absorben en el visible. Es decir, hay un intervalo de la radiación en el visible que no es absorbido por la clorofila.

Los pigmentos absorben los fotones que provienen del Sol cuya temperatura exterior es cercana a 6000 K. Por la Ley de Planck obtenemos que el 47 % de

las ondas electromagnéticas del espectro solar son visibles (figura 1). Usando la misma ley, obtenemos ahora que las longitudes de onda emitidas por un cuerpo a 300 K (medio ambiente a 27 °C) no están prácticamente en el intervalo visible, y por lo tanto, ninguno de los pigmentos que mencionamos puede absorberlas y reutilizarlas para la fotosíntesis (recuadro de la figura 1). Entonces cabe preguntarnos, ¿cuál es la temperatura mínima a la que debería de estar el medio ambiente para que alguno de los pigmentos absorba su radiación? La respuesta nos la da la Ley de Wien y es de 2200 K (temperatura aproximada del filamento incandescente de una bombilla). A esa temperatura las plantas sólo absorberían el 3% de la radiación emitida (figura 2).

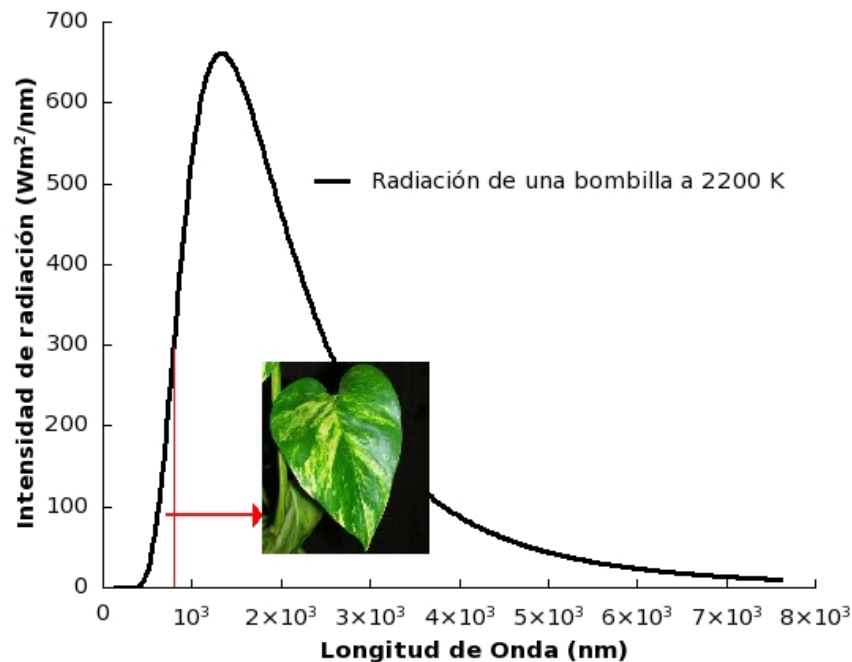


Fig 2. Presentamos el espectro de absorción de un cuerpo negro a $T=2200\text{ K}$ según Planck, las hojas de las plantas absorben la porción de energía limitada por la línea roja.



De lo anterior, podemos concluir que en condiciones normales (temperatura ambiente) las plantas no son capaces de reutilizar la radiación térmica del medio ambiente para separar las cargas en el proceso de fotosíntesis. Sin embargo, el calentamiento de los pigmentos favorece la transferencia de carga hacia el RC [8]. Milewski y colaboradores afirman que los organismos vivos maximizan su intensidad energética E , reutilizando por ejemplo los fotones de la radiación térmica que emiten al medio. En este artículo hemos analizado las regiones de absorción de los pigmentos y hemos concluido que esta hipótesis no es factible en los pigmentos fotosintéticos de las plantas.

Nosotros consideramos que el concepto de eficiencia, tal como se le define en la Física, difícilmente puede ser utilizado para calificar a todo un organismo, dado que es complicado incorporar en un solo parámetro todas las funciones y procesos de un ser vivo es más, hay aspectos cuantitativos del proceso que todavía desconocemos. En el mejor de los casos, consideramos que se puede comparar la "eficiencia" de algunos procesos de un organismo. Por ejemplo, podemos comparar la eficiencia (η) de la conversión de energía solar a eléctrica de una celda fotovoltaica, con la η de la conversión de energía solar a eléctrica que se da en el primer paso de la fotosíntesis de las plantas.

Sin embargo, es frecuente encontrar la comparación directa entre la η de conversión de energía solar a eléctrica de una celda fotovoltaica, y la eficiencia de conversión de energía solar a biomasa de una planta. Se reporta para la celda fotovoltaica de silicio cristallino una $\eta=23\%$ y para la planta $\eta=8-10\%$ [6,9]. Pensamos que esta comparación no es adecuada pues los productos finales de la conversión de la energía solar son distintos, en la celda se obtiene directamente energía eléctrica y en la planta se obtiene biomasa.

Por lo anterior, pensamos que lo que sí es válido comparar, es la η de la conversión solar-eléctrica de la celda con la η de la conversión solar-eléctrica que se da en el primer paso de la fotosíntesis, donde se obtienen 4 electrones y otros subproductos a partir de la oxidación de 2 moléculas de agua. En los pasos posteriores, se usarán algunos subproductos de la reacción 1 y electrones para reducir otras moléculas. Insistimos en que sólo nos enfocaremos en el número de electrones que una planta puede obtener en el primer paso fotosintético, a partir de absorber fotones solares. Sin embargo no poseemos información detallada del tiempo en que se obtienen los cuatro electrones, por lo tanto no podemos comparar con los datos de las celdas solares.

Reflexionando sobre el intervalo del espectro solar que los pigmentos fotosintéticos de las plantas absorben, surge la siguiente pregunta: Si el mayor número de fotones que el Sol emite tienen una longitud de onda de aproximadamente 550 nm (amarillo-verde), ¿Por qué las plantas no poseen pigmentos que absorban justamente esos fotones? Para responder a esta pregunta se ha planteado la siguiente hipótesis [10]: se sabe que hace cientos de millones de años, las bacterias púrpuras dominaban la población de seres vivos en la tierra, mientras que las plantas aún no existían; de modo que sus precursoras (las cianobacterias y algas) para sobrevivir en ese ambiente tuvieron que adaptarse a las longitudes de onda que las bacterias púrpura no absorbían. Entonces, parece que la "brecha amarilla-verde" de las plantas responde a un proceso de adaptación más que a uno de "eficiencia", pues eficiente hubiera sido absorber en 550 nm.

A modo de conclusión diremos que, los organismos vivos poseen características en su diseño y en sus procesos que les permiten sobrevivir, que no implica



que sean “eficientes”. Claramente este ejemplo ilustra como afirmaciones científicas requieren un mayor cuidado al ser emitidas y tienen que ser soportadas por datos experimentales y modelos teóricos. Deberíamos tratar de hacer a un lado nuestro prejuicio de “eficiencia en los seres vivos”, para seguir estu-

diando los procesos y mecanismos que están presentes en los seres vivos desde un punto de vista cuantitativo para permitir entenderlos y en alguna medida motivar los desarrollos tecnológicos futuros. Sin que ello afecte la admiración que sentimos por la “Naturaleza”.

REFERENCIAS

- [1] A. J. Lotka, “Contribution to the energetics of evolución”, *Proceeding of the National Academy of Science* 8(1992)147-151.
- [2] A. V. Milewski, A. J. Mills, “Does life consistently maximise energy intensity?”, *Biol. Rev.* 8(2010)859-879.
- [3] I. Asimov, 1960, “Nueva Guía de la Ciencia”, Editorial Plazas-Janes, Barcelona (España), pp. 545-551.
- [4] I. McConnell, G. Li and G. W. Brudvig, “Energy Conversion in Natural and Artificial Photosynthesis”, *Chemistry-Biology* 17(2010) 434-447.
- [5] <http://www.ks.uiuc.edu/Research/Categories/Bioenergy> (Consultada el 10 de septiembre de 2011).
- [6] A. Mellis, “Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency”, *Plant Science* 177(2009)272-280.
- [7] Cruz, Chamizo y Garritz, 1991. “Estructura atómica (un enfoque químico)”, Editorial Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, Estados Unidos, pp. 91-97.
- [8] M. Sener and K. Schulten, 2005. “Physical principles of efficient excitation transfer in light harvesting”, Editorial ENERGY HARVESTING MATERIALS, Singapore, pp. 1-26.
- [9] Egbert Boeker and Rienk van Grondelle, 1996. “Environmental physics”, John Wiley & Sons, England. pag. 140-142.
- [10] <http://www.livescience.com/1398-early-earth-purple-study-suggests.html> (consulted el 15 septiembre de 2011).



Datos de los autores

*Emilye Rose Landa Loustau
Centro de Investigación en Energía,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM), A. P.34, CP.62580 Temixco, Morelos, México.
Centro de Ciencias de la Complejidad
(UNAM), A. P.70472, CP.04510, D.F., México.
Email: erll@cie.unam.mx ,*

*Jesús Antonio del Río Portilla
Centro de Investigación en Energía,
Universidad Nacional Autónoma de México
(UNAM), A. P.34, CP.62580 Temixco, Morelos, México.
Centro de Ciencias de la Complejidad
(UNAM), A. P.70472, CP.04510, D.F., México.
Email: arp@cie.unam.mx*