

RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA: DESARROLLO DE UN MODELO EMPÍRICO PARA SU ESTIMACIÓN EN PLANO INCLINADO

M.J. Denegri

Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar)
Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES)
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Av. Constitución - C.P. 6700 – Luján
Tel: 02323-440241 e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 17/08/14, Aceptado 20/09/14

RESUMEN: Contar con información precisa sobre la irradiación fotosintéticamente activa incidente sobre la superficie terrestre es importante para el modelado de los sistemas agrícolas y ecológicos. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue establecer la relación entre la irradiación fotosintéticamente activa medida en planos inclinados con la habitualmente medida en plano horizontal y desarrollar un modelo simple que permita la transposición de uno a otro plano. Para esto se analizaron las relaciones entre las integrales diarias de irradiación fotosintéticamente activa medidas en plano horizontal y en planos inclinados formando ángulos de 30°, 45° y 60° en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján. Se encontró una única expresión que permite estimar la irradiación fotosintéticamente activa en planos inclinados hasta 60° con un coeficiente de determinación de 0,91 a partir de mediciones de la misma componente en el plano horizontal.

Palabras clave: radiación fotosintéticamente activa, modelo plano inclinado.

INTRODUCCIÓN

Contar con información precisa sobre la irradiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) incidente sobre la superficie terrestre es importante para el modelado de los sistemas agrícolas y ecológicos. Conocer el comportamiento de la componente fotosintética de la radiación solar tanto en planos inclinados como en planos horizontales permitirá mejorar los modelos que representan la fisiología de los cultivos y la precisión de los pronósticos de rendimiento que tengan a la componente fotosintética (o alguna variable derivada de ella) como dato de entrada. El desarrollo de modelos simples que permitan la conversión o transposición de la PAR en plano horizontal a planos inclinados es necesario, ya que cuando se dispone de información, ésta generalmente fue obtenida en el plano horizontal.

El objetivo principal de este trabajo es establecer la relación entre la irradiación fotosintéticamente activa medida en planos inclinados con la habitualmente medida en plano horizontal y desarrollar un modelo simple que permita el vuelco de uno a otro plano de manera sencilla.

Esta sería una herramienta útil, por ejemplo, para aquellos que trabajen con modelos de crecimiento de cultivos o del ciclo de carbono, ya que las hojas en las diferentes coberturas vegetales se encuentran en su mayoría inclinadas y no de manera horizontal, por lo que si se utilizara la energía que se está recibiendo en un plano horizontal, se podrían estar subestimando los resultados en algunas condiciones y sobreestimando en otras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones de irradiación fotosintéticamente activa en plano horizontal fueron obtenidas en la estación radiométrica de la Universidad Nacional de Luján con el sensor PAR-Lite de Kipp & Zonen, conectado a un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR10X, que midió los voltajes provenientes del sensor una vez por segundo y almacenó las integrales de la señal cada diez minutos. Luego, se calcularon también las integrales horarias y diarias.

Las mediciones de irradiación fotosintéticamente activa en plano inclinado (Q_{β}) se realizaron en dos etapas. En ambas se midió en superficies inclinadas formando ángulos de 30° ($\beta = -30^{\circ}$), 45° ($\beta = -45^{\circ}$), 60° ($\beta = -60^{\circ}$) con la horizontal, orientados al Norte ($\gamma = 0$) y se diferenciaron una de otra en el factor de visión de los sensores, ya que para la segunda etapa se fabricó un soporte con máscaras para que los sensores no recibieran nada de la radiación reflejada por el suelo, mientras que en la primera etapa el ángulo de visión de todos los sensores fue de 180°.

En la primera etapa se midió Q_{β} utilizando la estructura que se muestra en la fotografía (Figura 1) fabricada para ese fin. Sobre ella se colocaron sensores PAR fabricados por CNEA y previamente calibrados formando ángulos de 30°, 45°, 60° con la horizontal, como mencionáramos en el párrafo anterior. La estructura fue orientada hacia el Norte. Se eligieron equipos contruidos con el mismo filtro ("KG4"). En la Tabla 1 se resume qué sensor se colocó en cada plano.



Figura 1: Estructura para colocar los sensores en planos inclinados.

Plano	Sensor
Horizontal ($\beta = 0^\circ$)	PAR-Lite
Inclinado 30° orientado al Norte ($\beta = -30^\circ$)	PK 1009-3
Inclinado 45° orientado al Norte ($\beta = -45^\circ$)	PK 1009-2
Inclinado 60° orientado al Norte ($\beta = -60^\circ$)	PK 1009-1

Tabla 1: Lista de los sensores que fueron colocados en cada plano.

Este dispositivo estuvo montado entre el 29 de septiembre y el 19 de diciembre de 2010 (82 días con datos). Los equipos fueron interrogados una vez por segundo por un sistema automático de adquisición de datos Campbell CR1000, y esos valores integrados cada diez minutos. Luego del período de medición se retiraron los sensores y se calibraron nuevamente en plano horizontal para asegurar que las constantes de los equipos no hubieran sufrido cambios importantes en el tiempo transcurrido.

En la segunda etapa se midió la irradiación fotosintéticamente activa en planos con las mismas inclinaciones que en la primera etapa, colocando los sensores sobre una nueva estructura, fabricada también para este fin. Este soporte incorpora unas máscaras para que cada sensor vea sólo la fracción de cielo que está por encima del horizonte, de manera que en las mediciones no aparezca el efecto del albedo. La segunda etapa de mediciones comenzó el 28 de diciembre de 2011 y se extendió hasta el 3 de enero de 2013. Los sensores fueron conectados a dos adquisidores de datos marca Novus con dos canales cada uno, que interrogaron a los equipos una vez por minuto y guardaron un promedio cada diez minutos. La estructura fue orientada, al igual que en la primera etapa, hacia el Norte. En la Tabla 2 se indica cuáles fueron los sensores utilizados, en qué ángulos se montaron y a qué datalogger fueron conectados. En la Figura 2 se muestra como quedaron dispuestos sobre el soporte. Pevio a la instalación en los planos inclinados, los sensores fueron calibrados en el plano horizontal.



Figura 2: Estructura sobre la cual se montaron los sensores en planos inclinados con las máscaras para eliminar el albedo, y los datalogger en un recipiente estanco.

Plano	Sensor	Datalogger
Horizontal ($\beta = 0^\circ$)	PAR-Lite	CR10X – canal 2
Inclinado 30° orinetado al norte ($\beta = -30^\circ$)	PK 1009-3	10068981 – canal 2
Inclinado 45° orientado al norte ($\beta = -45^\circ$)	PK 1009-2	10084587 y 11183205 – canal 2
Inclinado 60° orientado al norte ($\beta = -60^\circ$)	PK 1009-1	10068981 – canal 1

Tabla 2: Lista de los sensores que fueron colocados en cada plano, y adquisidor de datos al que fueron conectados.

Para eliminar el efecto de las variaciones astronómicas que afectan la estacionalidad de la radiación, se calculó el índice de claridad para el rango fotosintéticamente activo del espectro (K_{TPAR}), que representa la cantidad efectiva de PAR que llega a superficie en relación a la cantidad disponible en el tope de la atmósfera. Las expresiones usadas para calcular el K_{TPAR} para el plano horizontal y los planos inclinados se muestran en las ecuaciones (1) y (2) que Pacheco de Souza y otros (2009) plantean para irradiación solar global y en este trabajo adaptamos al rango fotosintéticamente activo.

$$K_{TPAR} = \frac{Q}{Q_0} \quad (1)$$

$$K_{TPAR_b} = \frac{Q_\beta}{Q_{0\beta}} \quad (2)$$

Para estimar la irradiación en el tope de la atmósfera Q_0 y $Q_{0\beta}$ fueron utilizadas las ecuaciones (3) y (4), tomadas de Duffie & Beckman (2006) y adaptadas a la fracción fotosintética del espectro:

$$Q_0 = \frac{24}{\pi} 3.600 I_{SCPAR}^0 E_0 \left(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \omega_s \frac{\pi}{180^\circ} \text{sen} \varphi \text{sen} \delta \right) \quad (3)$$

$$Q_{0\beta} = \frac{24}{\pi} 3.600 I_{SCPAR}^0 E_0 \left[\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega_s' + \omega_s' \frac{\pi}{180^\circ} \text{sen}(\varphi - \beta) \text{sen} \delta \right] \quad (4)$$

donde $I_{SCPAR}^0 = 2.423,4 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ es la constante solar en el rango de longitudes de onda fotosintéticamente activo (39,1 % de la constante solar I_{SC}), D es el día juliano, φ es la latitud, β es el ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal, δ es la declinación solar y ω_s' se elige como el menor de los ángulos de salida del sol entre los correspondientes al plano horizontal y al plano inclinado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder determinar si existe un patrón entre los valores medidos en plano inclinado y en plano horizontal que pueda ser ajustado por alguna expresión común representamos los valores diarios de K_{TPAR_b} en función de los valores de K_{TPAR} . En la Figura 3 se presentan los gráficos de dispersión para los planos inclinados 30° , 45° y 60° con los datos medidos en la primera etapa de mediciones.

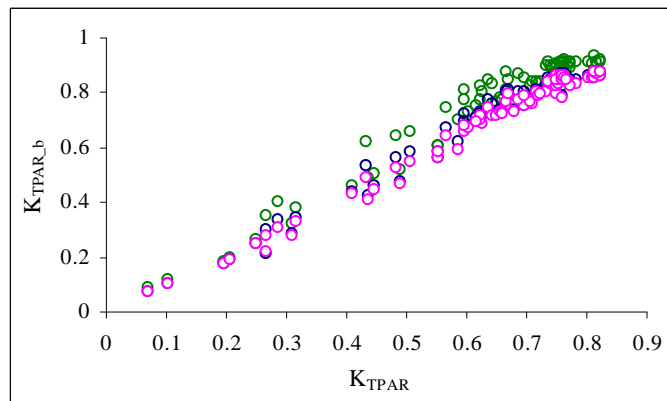


Figura 3: Relación entre $K_{TPAR_30^\circ}$ y K_{TPAR} (\circ), $K_{TPAR_45^\circ}$ y K_{TPAR} (\circ), $K_{TPAR_60^\circ}$ y K_{TPAR} (\circ) para la primera etapa de mediciones.

Es notable la linealidad entre los valores de K_{TPAR} y K_{TPAR_β} . A medida que aumenta el ángulo de inclinación del plano la dispersión también lo hace, y una de las causas podría ser que los sensores ubicados en los planos inclinados reciben un mayor aporte de la radiación reflejada en el suelo a medida que el ángulo con el plano horizontal aumenta. Las rectas que mejor ajustan a los datos en cada caso son mostradas en la Tabla 3.

Rectas de ajuste (todo tipo de cielo)	R^2	N
$Q_{30^\circ} = Q_{0\ 30^\circ} [(1,15 \pm 0,02) K_{TPAR} - (0,04 \pm 0,01)]$	0,98	79
$Q_{45^\circ} = Q_{0\ 45^\circ} [(1,14 \pm 0,02) K_{TPAR} - (0,02 \pm 0,01)]$	0,98	79
$Q_{60^\circ} = Q_{0\ 60^\circ} [(1,17 \pm 0,03) K_{TPAR} + (0,01 \pm 0,02)]$	0,96	79

Tabla 3: Rectas de ajuste de Q_β en función de K_{TPAR} , junto con sus coeficientes de determinación y el número de casos considerado para la primera etapa de mediciones.

Observando los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos, vemos que podríamos estimar los valores diarios de irradiación fotosintéticamente activa en plano inclinado (Q_β) utilizando los valores de K_{TPAR} y de $Q_{0\beta}$ ya que su comportamiento explica más del 95 % de las variaciones de la componente fotosintética en el plano inclinado. Considerando todo el conjunto de datos, los valores de K_{TPAR_β} para los planos inclinados a lo largo del período considerado fueron superiores al de K_{TPAR} y eso se manifiesta en valores superiores a uno para las pendientes de las rectas de ajuste.

Comparando las pendientes de las rectas de ajuste para los planos inclinados 30°, 45° y 60°, vemos que éstas son similares; así obtuvimos una expresión considerando un solo conjunto de datos sin discriminar en función de la inclinación del plano y se muestra en la ecuación (5).

$$(5) \quad Q_\beta = Q_{0\beta} [(1,15 \pm 0,02) K_{TPAR} - (0,02 \pm 0,01)]$$

donde K_{TPAR} es el índice de claridad en el rango fotosintéticamente activo, determinado como el cociente entre la PAR que llega a superficie y la PAR estimada a tope de atmósfera siempre para un plano horizontal, y $Q_{0\beta}$ es la irradiación fotosintéticamente activa en el tope de la atmósfera en una superficie inclinada un ángulo β hacia el Norte. El coeficiente de determinación fue de 0,96 lo que indica que utilizando los datos de PAR en plano horizontal podemos explicar con este modelo lineal un 96 % del comportamiento de la componente fotosintética en planos inclinados hasta 60°.

La relación entre los valores diarios de K_{TPAR} y K_{TPAR_β} encontrada con la segunda etapa de mediciones, es decir sin tener en cuenta el aporte de la radiación reflejada por el suelo, se presenta en la Figura 4.

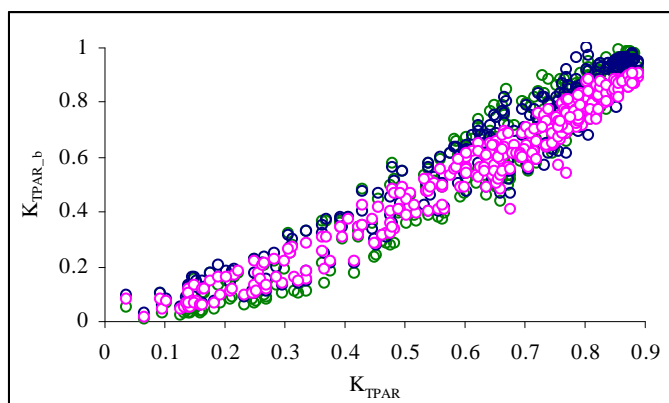


Figura 4: Relación entre $K_{TPAR_{30^\circ}}$ y K_{TPAR} (\circ), $K_{TPAR_{45^\circ}}$ y K_{TPAR} (\circ), $K_{TPAR_{60^\circ}}$ y K_{TPAR} (\circ) para la segunda etapa de mediciones.

Al igual que en el análisis anterior, es notable la linealidad entre los valores de K_{TPAR} y K_{TPAR_β} y también a medida que aumenta el ángulo de inclinación del plano la dispersión también lo hace. Las rectas que mejor ajustan a los datos en cada caso, junto con el coeficiente de determinación y el número de casos analizados se muestran en la Tabla 4, donde podemos ver que conociendo el comportamiento de la PAR en el plano horizontal podríamos llegar a explicar en más del 90 % el comportamiento de la PAR en un plano inclinado hasta 60°.

Rectas de ajuste (todo tipo de cielo)	R ²	N
$Q_{30^\circ} = Q_{0,30^\circ} [(1,11 \pm 0,01) K_{TPAR} - (0,12 \pm 0,01)]$	0,96	357
$Q_{45^\circ} = Q_{0,45^\circ} [(1,16 \pm 0,02) K_{TPAR} - (0,11 \pm 0,01)]$	0,92	283
$Q_{60^\circ} = Q_{0,60^\circ} [(1,20 \pm 0,02) K_{TPAR} - (0,16 \pm 0,01)]$	0,92	353

Tabla 3: Rectas de ajuste de Q_β en función de K_{TPAR} , junto con sus coeficientes de determinación y el número de casos considerado para la segunda etapa de mediciones.

Si consideramos un solo conjunto de datos sin discriminar por el ángulo de inclinación del plano, la expresión que mejor ajusta la relación entre la irradiación fotosintéticamente activa en plano horizontal y plano inclinado, es la siguiente (ecuación 6), cuyo coeficiente de determinación es de 0,93:

$$(6) \quad Q_\beta = Q_{0\beta} [(1,15 \pm 0,01) K_{TPAR} - (0,13 \pm 0,01)]$$

La pendiente de la expresión es similar a la encontrada a partir de los datos medidos en la primera etapa, lo que estaría indicando que podría ser aplicada entonces en Luján una única expresión para obtener los valores de PAR en planos inclinados hasta 60° partiendo de la información que se tiene para el plano horizontal. Teniendo en cuenta esto, reunimos las dos bases de datos y buscamos la expresión que mejor ajustara la relación entre la PAR medida en plano horizontal y esta misma variable medida en planos inclinados hasta 60°. En la ecuación 7 se presenta la recta que mejor ajustó la relación con un coeficiente de determinación de 0,91.

$$(7) \quad Q_\beta = Q_{0\beta} [(1,15 \pm 0,01) K_{TPAR} - (0,11 \pm 0,01)]$$

donde $Q_{0\beta}$ es la irradiación fotosintéticamente activa en el tope de la atmósfera para un plano inclinado un ángulo β hasta 60° y K_{TPAR} es el índice de claridad calculado para el rango fotosintéticamente activo del espectro solar.

CONCLUSIONES

Como principal resultado se destaca la expresión general encontrada para estimar la irradiación fotosintéticamente activa en plano inclinado en función de la misma variable medida en el plano horizontal. El hecho de haber encontrado expresiones similares a partir de los datos obtenidos durante la primera y la segunda etapa de mediciones, llevó a considerar que podría ser aplicada en Luján una única expresión para obtener los valores diarios de PAR en planos inclinados.

Teniendo en cuenta esto, la expresión que mejor ajustó la relación entre la PAR medida en plano horizontal y esta misma variable medida en planos inclinados hasta 60° resultó ser la siguiente, con un coeficiente de determinación de 0,91:

$$Q_\beta = Q_{0\beta} [(1,15 \pm 0,01) K_{TPAR} - (0,11 \pm 0,01)]$$

donde $Q_{0\beta}$ es la irradiación fotosintéticamente activa en el tope de la atmósfera para un plano inclinado un ángulo β (expresión válida hasta 60°) y K_{TPAR} es el índice de claridad calculado para el rango fotosintéticamente activo del espectro solar. Esta expresión indica que en Luján sobre los planos inclinados hasta 60°, en promedio, se recibe un 15,0 % más de irradiación fotosintéticamente activa que sobre el plano horizontal, ya que un plano inclinado (variando entre 0° y 60° a lo largo del año) recibe la componente directa con un ángulo de incidencia más cercano a 90° que el plano horizontal.

NOMENCLATURA

Q	radiación fotosintéticamente activa global diaria [mol m ⁻²]
Q_0	radiación fotosintéticamente activa extraterrestre diaria incidente en una superficie horizontal [mol m ⁻²]
Q_β	radiación fotosintéticamente activa en plano inclinado [mol m ⁻²]
$Q_{0\beta}$	radiación fotosintéticamente activa extraterrestre diaria incidente en una superficie inclinada un ángulo β [mol m ⁻²]
D	día juliano
K_{TPAR}	índice de claridad para el rango fotosintéticamente activo del espectro [Q/Q_0]
$K_{TPAR\beta}$	índice de claridad para el rango fotosintéticamente activo del espectro en un plano inclinado un ángulo β [$Q_\beta/Q_{0\beta}$]
I_{SCPAR}^0	constante solar a la distancia media entre la Tierra y el Sol para el rango fotosintéticamente activo del espectro [2423,45 mol m ⁻²]
β	ángulo de inclinación del plano o superficie receptora [°]
ω_s	ángulo horario al ocaso o al alba (-, +) [°]
ϕ	latitud [°]
δ	declinación solar [°]

REFERENCIAS

Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes (3° edición). Wiley Interscience. Capítulo 1.
Pacheco de Souza, A., Escobedo, J.F. y Dal Pai, A. (2009). Estimativas da irradiação direta em superfícies inclinadas com base em medidas em superfícies horizontais. Anales CLIMET XIII - CONGREGMET X, en soporte digital.

PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION: DEVELOPMENT OF AN EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING ON TILTED PLANES

ABSTRACT: Accurate information about photosynthetically active radiation incident on the earth's surface is important for agricultural and ecological system models. Therefore, the aim of this study was to establish the relationship between photosynthetically active radiation on tilted planes with the usually measured in horizontal plane and develop a simple model that allows the transposition from one to another plane. The relations between daily integrals of photosynthetically active radiation measured in horizontal and 30°, 45° and 60° tilted planes in the radiometric station of the National University of Luján are analyzed. A unique expression to estimate photosynthetically active radiation on tilted planes up to 60° from measurements of the same component in the horizontal planes was found with a determination coefficient of 0.91.

Keywords: Tilted plane model, photosynthetically active radiation