

SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA SOLAR COLECTADA POR CUERPOS GEOMÉTRICOS ASOCIADOS A FORMAS DE COPA DE ÁRBOL PARA DÍA DE CIELO CLARO USANDO EL MODELO DE BIRD

Germán Salazar^{1*}, Diego Salve^{2}, Pablo Gerbi²**

¹UNSa-INENCO - Avda. Bolivia 5150 - CP A4408FVY - Salta Capital - Salta - Argentina

²INTA IPAF NOA - Ruta Nacional N°9 km 1763 - CP 4622 - Posta de Hornillos - Maimará - Jujuy - Argentina

Recibido 18/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: A nivel mundial se ha investigado ampliamente el efecto de la radiación solar en las plantas. Se han propuesto distintos modelos con el objetivo de simplificar los cálculos necesarios para cuantificar la interacción entre la radiación y el dosel vegetal. En este trabajo se desarrolló un modelo básico, utilizando factores y coeficientes empleados universalmente, que permite estimar la cantidad de energía solar que pueden coleccionar tres cuerpos geométricos, que representan copas de árboles, en cualquier latitud y estación del año. Mediante el modelo para día de cielo claro de Bird se incorporó también el efecto que produce la atmósfera sobre la radiación incidente y sus consecuencias sobre la colección que realizan dichos cuerpos. Si bien es un modelo simple, los resultados obtenidos son de gran interés para comprender la distribución espacial y la eficiencia en la colección de radiación solar asociada a las distintas arquitecturas vegetales.

Palabras clave: Radiación solar, simulación, canopia, cuerpos geométricos, colección, Bird.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es uno de los principales factores ambientales que afectan la vida en nuestro planeta ya que de ella depende el funcionamiento de los procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperiodo, fototropismos, etc.). Ésta también afecta a otros factores ambientales (temperatura, humedad relativa, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.) que finalmente inciden en la distribución de los organismos.

Para que la radiación solar proporcione la energía necesaria para los procesos fisiológicos de las plantas, debe ser interceptada y penetrar en las hojas. Se ha comprobado que la productividad de las plantas depende de la capacidad de la cubierta vegetal (o dosel arbóreo, al que llamaremos también copa o canopia) para interceptar la radiación (Campillo et al. 2012). Se han estudiado distintos parámetros para caracterizar dicha capacidad, uno de ellos es el área foliar disponible. Watson en 1947 describe el índice de área foliar como la relación entre el área total de un lado del tejido foliar y la superficie de suelo, y lo relaciona con la tasa neta de asimilación de la radiación, es decir, la cantidad de biomasa producida por unidad de área foliar y por unidad de tiempo. Sus resultados demostraron una proporción directa entre el índice de área foliar y tasa neta de asimilación.

Además de la cuantificación del área foliar, se han propuesto otros factores a tener en cuenta para caracterizar al dosel arbóreo. Debido a que la distribución de las hojas tiene efectos agronómicos y ecológicos, se han evaluado las implicancias del acimut (Barillot et al., 2011) y del ángulo de inserción de las hojas (Maddonni et al., 2001). Monsi y Saeki (1953) aplicaron una analogía de la ley de extinción de Lambert-Beer a los doseles de las plantas. La ley de Lambert-Beer expresa la atenuación de la radiación al atravesar un medio turbio homogéneo. En dicho medio, el flujo se atenúa en proporción a la distancia óptica relacionada a un coeficiente de extinción (k).

*Investigador Adjunto CONICET

**Becario Doctoral CONICET

Al modelar la relación entre la fracción de radiación fotosintéticamente activa incidente que es interceptada por un dosel y la distribución de las hojas, se observó que un valor alto de k , que implica una distribución horizontal, permite un aumento de la radiación interceptada por las plantas pequeñas. Por el contrario, un menor valor de k puede ser ventajoso para interceptar la radiación cuando el ángulo cenital es grande (invierno, altas latitudes) (Campillo et al., 2012).

Se han desarrollado algunos modelos que emplean cuerpos geométricos para representar los componentes de la canopia (ramas, pecíolos y hojas). Otros utilizan figuras para descomponer la superficie foliar en polígonos regulares y simplificar así los cálculos necesarios para obtener el área (Myneni et al., 1997; Barillot et al., 2011). Pero en ninguno de estos modelos se considera la arquitectura general de la canopia como un factor importante en la colección de radiación debido a la dificultad de generar un modelo geométrico que considere todas las características estructurales de la canopia.

En este trabajo se desarrolló un modelo básico que permite estimar la energía solar captada por cuerpos geométricos asociados a la forma de las copas de los árboles, en cualquier latitud y día del año. Se puso a prueba la idea de que la arquitectura de la copa está relacionada con la cantidad de radiación solar que puede coleccionar. Específicamente se buscó determinar si existen estructuras arbóreas que captan la radiación solar con mayor eficiencia que otras, si esa eficiencia está relacionada con la ubicación geográfica y la época del año, y cuáles son los efectos atmosféricos básicos que afectan a la radiación solar incidente.

MÉTODO

Sin atmósfera terrestre (SinAm)

Se realizó la simulación de la cantidad de energía solar coleccionada por una canopia. Para ello se utilizaron tres cuerpos básicos: un cono, un cilindro y una esfera, que imitan la estructura general de una copa. A continuación se establecen los criterios geométricos de dichos cuerpos y el resto de los condicionamientos temporales y espaciales:

- i) **El área de colección de las tres formas es constante.** Se considera que los tres cuerpos están sobre el suelo, por lo que las superficies inferiores del cono y del cilindro no se incluyen en el cálculo.

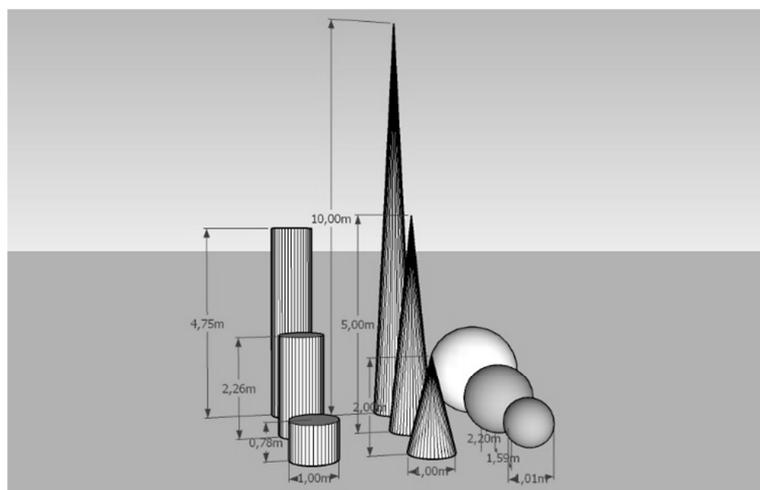


Figura 1 Comparativa de tamaños de las canopias según la relación d/h del cono, manteniendo la misma área para cada caso (1/2, 1/5 y 1/10).

- ii) **El área de colección del cono se usó de referencia para los demás cuerpos.**
- iii) **La relación entre el diámetro de la base (d) y la altura (h) del cono d/h no superó 1/2.** Se consideraron las relaciones 1/2, 1/5 y 1/10.
- iv) **Las dimensiones de la base del cono son iguales a las del cilindro.** Dado que se usó el cono para fijar el área de referencia, consecuentemente se fijó también uno de los parámetros del cilindro (d o h) para que el área total del mismo sea equivalente a la del cono. En este caso, se optó por hacer que el diámetro de la base del cilindro sea igual al del cono.

- v) **Se realizaron los cálculos para tres días julianos específicos:** $n = 172$ (invierno para el hemisferio sur), $n = 264$ (otoño/primavera) y $n = 355$ (verano).
- vi) **Se realizaron los cálculos para cuatro latitudes específicas:** -60° , -40° , -20° y 0° .

Calcular la cantidad de energía solar directa normal incidente en una superficie curva requiere del manejo de técnicas matemáticas que exceden el objetivo de este trabajo. Para simplificar los cálculos se utilizaron aproximaciones usando figuras geométricas sencillas: el cono se aproximó con una pirámide de 40 caras, y el cilindro se aproximó con un paralelepípedo de 40 caras. De esta manera las ecuaciones que se deben aplicar para calcular la irradiación solar colectada son más sencillas por tratarse de superficies planas. Más adelante se analizará el caso de la esfera.

Para determinar la cantidad de energía que llega a un plano se debe establecer: el valor de la irradiancia extraterrestre $I_{0,ext}$, el ángulo cenital θ_z (ángulo entre la normal al suelo y la posición del Sol en el cielo) y el ángulo de incidencia θ (ángulo entre la normal a cada cara y la posición del Sol en el cielo). El valor del ángulo θ_z indica si es de día ($\cos \theta_z > 0$) y el valor del ángulo θ indica si el plano en cuestión está siendo iluminado por el Sol ($\cos \theta > 0$).

El cálculo de la irradiancia solar extraterrestre $I_{0,ext}$ se realizó usando las siguientes ecuaciones (Duffie y Beckman, 2013):

$$\omega = 15 \frac{^\circ}{hora} (12 - HS) \quad (1)$$

donde HS es la hora solar y ω es el ángulo horario,

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

donde δ es la declinación y n es el día juliano del año,

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \quad (3)$$

donde θ_z es el ángulo cenital y ϕ es la latitud,

$$\gamma_s = \operatorname{signo}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \operatorname{sen} \phi - \operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (4)$$

donde γ_s es el acimut solar,

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \operatorname{sen} \theta_z \operatorname{sen} \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (5)$$

donde β es la inclinación del plano respecto a la horizontal y γ es el acimut del plano,

$$I_{0,ext} = I_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (6)$$

donde I_{cs} es la constante solar ($\approx 1367 \text{ W/m}^2$),

$$\text{Radiación colectada} = I_{0,ext} * \cos \theta * \text{Superficie colectora} \quad (7)$$

Debe notarse que al trabajar directamente con la hora solar (HS) en vez de con la hora local estándar (hora reloj), los cálculos se simplifican, ya que no es necesario hacer correcciones por diferencias entre longitud y longitud oficial GMT, ni es necesario aplicar la Ecuación del Tiempo. Así, lo que se hace es calcular la cantidad de energía solar colectada por cada plano, tanto en las caras de la pirámide como en las del paralelepípedo. Para este último se debe considerar también la cara superior como superficie colectora.

Dado que el ángulo entre planos (caras externas) consecutivos siempre es mayor a 180°, no se produce sombreado de una cara sobre otra en ninguno de los cuerpos considerados, por lo que la cantidad total de radiación solar colectada puede calcularse de manera aditiva.

El caso de la esfera es especial, ya que no es posible hacer una aproximación geométrica sencilla de la misma. Sin embargo, su simetría espacial hace posible usar resultados de integrales conocidas. Durante el día, la esfera siempre tendrá iluminada solamente la mitad de su superficie, mientras que la otra estará a oscuras. Por ello se debe calcular la integral de superficie del producto vectorial de la irradiancia $I_{0,ext}$ por el vector normal a cada punto de la superficie iluminada. Dado que los rayos solares pueden considerarse como si siempre estuvieran perpendiculares al hemi-casquete esférico, resulta que dicha integral es igual al producto escalar de la superficie del círculo (proyección a 2D del casquete 3D) por el valor de la irradiancia solar.

Se diseñó una hoja de cálculo que contuviera toda esta información y que realizara los cálculos para cada una de las caras de cada cuerpo geométrico que representa cada canopia. Dicha hoja de cálculo requiere como entrada los parámetros geométricos de la canopia, la latitud y el día del año; y como resultado arroja el valor de irradiación extraterrestre colectada por cada en cada estructura geométrica a lo largo del día ingresado.

Con atmósfera terrestre (ConAm)

Modelar la irradiancia solar en atmósfera requiere considerar la atenuación por interacción con los componentes atmosféricos y el hecho de que, al atravesar la misma, se produce una absorción selectiva (Badescu, 2008). Los componentes más importantes, desde el punto de vista de la atenuación para día de cielo claro, son: el vapor de agua, el ozono, la mezcla de gases y los aerosoles (Gueymard, 1995). Otra variable importante es la presión atmosférica, que está directamente relacionada con la altitud sobre el nivel del mar a la que se supone se realiza el modelado.

Se utilizó el Modelo Simple de Cielo Claro de Bird (Bird y Hulstrom, 1981) para simular los valores de la irradiancia solar directa normal al haz y la irradiancia difusa. El mismo está basado en el trabajo de Leckner (1978) y estima el valor de la irradiancia solar Directa Normal al Haz I_{DN} y el valor de la irradiancia solar Difusa I_D en superficie plana horizontal. La aplicabilidad de la irradiancia I_{DN} es inmediata ya que vectorialmente es igual al caso SinAm ($I_{0,ext}$), solo varía su módulo. Para el caso de la I_D se considera que la misma no posee dirección preferencial (anisotropía) por lo que solo se considera su módulo.

Las ecuaciones postuladas por Bird y Hulstrom, y utilizadas en este modelo para calcular la irradiancia directa ($I_{DN,\lambda}$) en una superficie normal a la dirección del sol para una longitud de onda determinada son:

$$I_{DN,\lambda} = I_{ext,0\lambda} T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{w\lambda} T_{o\lambda} T_{u\lambda} \quad (8)$$

donde $I_{ext,0\lambda}$ es la irradiancia extraterrestre para la distancia media Tierra-Sol para una longitud de onda λ (ya corregida por la distancia Tierra-Sol), y $T_{r\lambda}$, $T_{a\lambda}$, $T_{w\lambda}$, $T_{o\lambda}$ y $T_{u\lambda}$ son las funciones de transmitancia de la atmósfera para una longitud de onda λ para dispersión molecular, atenuación por aerosoles, absorción por el vapor de agua, absorción por el ozono, y absorción por la mezcla uniforme de gases atmosféricos, respectivamente. Para calcular el factor de dispersión molecular (Rayleigh):

$$T_{r\lambda} = \exp\left\{-M' / \left[\lambda^4 \left(115,6406 - \frac{1,335}{\lambda^2}\right)\right]\right\} \quad (9)$$

donde M' es la presión corregida de la masa de aire, la que se calcula a partir de

$$M = [\cos\theta_z + 0,15 * (93,885 - \theta_z)^{-1,253}]^{-1} \quad (10)$$

donde θ_z es el ángulo del cenit solar, de donde se define

$$M' = M * P/P_0 \quad (11)$$

donde P_0 es igual a 1013 hPa y P es la presión atmosférica medida en la superficie

Para calcular el factor de atenuación por aerosoles:

$$T_{\alpha\lambda} = \exp(-\beta_n \lambda^{-\alpha_n} M) \quad (12)$$

donde α_n y β_n son valores de turbidez para determinadas longitudes de onda, nótese que la turbidez en la ecuación (12) queda representada por la ecuación de Angstrom (13)

$$\tau_{\alpha\lambda} = \beta_n \lambda^{-\alpha_n} \quad (13)$$

Para calcular el factor de absorción por vapor de agua:

$$T_{w\lambda} = \exp\left[\frac{0,2385\alpha_{w\lambda}WM}{(1+20,07\alpha_{w\lambda}WM)^{0,45}}\right] \quad (14)$$

donde W es el vapor de agua precipitable y $\alpha_{w\lambda}$ es el coeficiente de absorción del vapor de agua para la longitud de onda λ .

Para calcular la absorción por el ozono y la mezcla uniforme de gases:

$$T_{0\lambda} = \exp(-\alpha_{o\lambda} O_3 M_o) \quad (15)$$

donde $\alpha_{o\lambda}$ es el coeficiente de absorción del ozono, O_3 es la cantidad de ozono y M_o es la masa del ozono. Ésta última está dada por la ecuación (16).

$$M_o = \left(1 + \frac{h_o}{6370}\right) / \left[\cos^2(\theta_z) + \frac{2h_o}{6370}\right]^{0,5} \quad (16)$$

donde h_o es la altura de la máxima concentración de ozono.

$$T_{u\lambda} = \exp\left[-\frac{1,41\alpha_{u\lambda}M'}{(1+118,93\alpha_{u\lambda}M')^{0,45}}\right] \quad (17)$$

donde $\alpha_{u\lambda}$ es el coeficiente que combina la absorción y la cantidad de gases.

Para estimar la irradiancia difusa se empleó la ecuación (18), la cual depende de 3 componentes, representados por las siguientes ecuaciones:

$$I_{D,\lambda} = I_{r\lambda} + I_{\alpha\lambda} + I_{g\lambda} \quad (18)$$

donde $I_{D,\lambda}$ es la irradiancia difusa, $I_{r\lambda}$ es la dispersión de Rayleigh, $I_{\alpha\lambda}$ es la dispersión por aerosoles y $I_{g\lambda}$ es la suma de reflexión de la irradiancia por la superficie y el aire.

$$I_{r\lambda} = I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) T_{0\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{\alpha\lambda} (1 - T_{r\lambda}^{0,95})^{0,5} \quad (19)$$

donde $T_{\alpha\lambda}$ es la transmitancia de la absorción de aerosoles

$$I_{\alpha\lambda} = I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) T_{0\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{\alpha\lambda} T_{r\lambda}^{1,5} (1 - T_{\alpha s\lambda}) F_s \quad (20)$$

donde $T_{\alpha s\lambda}$ es la transmitancia de la dispersión de los aerosoles y F_s es la fracción de la dispersión por aerosoles.

$$I_{g\lambda} = (I_{ext,0\lambda} \cos(\theta_z) + I_{r\lambda} + I_{\alpha\lambda}) r_{s\lambda} r_{g\lambda} / (1 - r_{s\lambda} r_{g\lambda}) \quad (21)$$

donde $r_{s\lambda}$ es el albedo superficial para la longitud de onda λ y $r_{g\lambda}$ es la reflectividad del cielo para la longitud de onda λ .

Estas expresiones dependen de la longitud de onda λ , por lo que para obtener resultados se deben integrar. Por lo general dicha integración se realiza de manera paramétrica, tal y como lo hace el modelo híbrido de Yang (Yang et al., 2001). Por cuestiones de extensión del artículo, se omitirá mostrar las expresiones paramétricas de integración para cada transmitancia. Sin embargo ha sido mostrada la esencia del modelo que considera la atenuación de la irradiancia solar al atravesar la atmosfera.

RESULTADOS

Antes de mostrar los resultados obtenidos, a continuación se ejemplifica cómo es el uso de las ecuaciones para calcular la radiación solar colectada por un plano inclinado 90° (canopia cilíndrica) con acimut de 0° , para la latitud de -20° , en el mediodía solar del día juliano 355.

$$\omega = 15 \frac{^\circ}{\text{hora}} (12 - 12,00) = 0,00 \text{ Rad}$$

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left(360 \frac{284+355}{365} \right) = -23,45^\circ = -0,409 \text{ Rad}$$

$$\cos \theta_z = 0,94 * 0,92 * 1 + (-0,34 * -0,39) = 0,99 \text{ Rad}$$

Al ser positivo indica que el sol se encuentra por encima del horizonte,

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{(0,99 * (-0,34)) - (-0,39)}{0,06 * 0,94} \right) \right| = 0,000001 \text{ Rad}$$

$$\cos \theta = (0,99 * 0) + (0,06 * 1 * \cos(0,000001 - 0)) = 0,06 \text{ Rad}$$

Al ser positivo indica que el plano está recibiendo radiación solar,

$$I_{0,ext} = 1367 \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 * 355}{365} \right) = 1411,44 \text{ W/m}^2$$

Por último, la radiación solar colectada al mediodía solar del día juliano 355 por la superficie de acimut 0° e inclinación respecto a la horizontal de 90° en un área de $0,099 \text{ m}^2$ es:

$$1411,44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,06 * 0,099 \text{ m}^2 = 8,47 \text{ W}$$

El resultado positivo demuestra que en el día juliano y la latitud propuestos, el sol se encuentra por encima del horizonte e ilumina la superficie con el acimut y la inclinación elegidos. Se debe destacar la importancia del día juliano en el numerador de la ecuación (6), ya que al modificarlo, varía la $I_{0,ext}$, la cual es directamente proporcional a la radiación colectada en la ecuación (7). La misma proporción existe con la superficie colectora y el $\cos \theta$. Éste último podría tomar valores más grandes si se modificaran la inclinación y el acimut de la superficie.

En la Fig. 2 se muestran los valores de irradiancia colectada por canopia al realizar las estimaciones para las siguientes relaciones d/h , latitudes y día del año, para el caso SinAm:

- d/h : 1/2, 1/5 y 1/10.
- Latitud: -60° , -40° , -20° y 0° .
- $n = 172, 264$ y 355 .

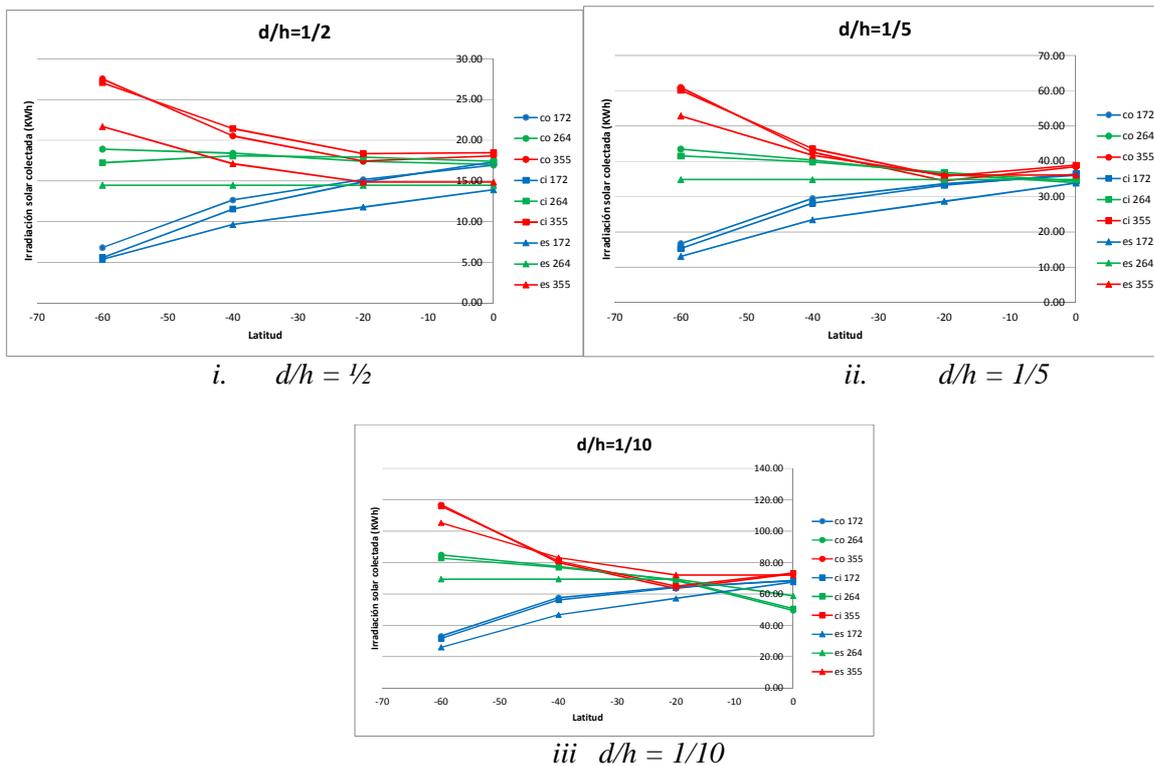


Figura 2. Cantidad de irradiación solar extraterrestre $I_{0,ext}$ ($SinAm$) colectada para diferentes d/h (co = cono, ci = cilindro, es = esfera) durante un día específico del año (172 = 21 jun, 264 = 21 sep y 355 = 21 dic) a diferentes latitudes (-60° , -40° , -20° y 0°). Los valores están expresados en kWh.

Los resultados para el caso ConAm serán discutidos dentro de un solo caso testigo, ya que deberían agregarse a la d/h , latitud y día del año, factores como la altura sobre el nivel del mar, cantidad de agua precipitable y la turbidez atmosférica. Eso generaría la necesidad de graficas demasiado complejas como para extraer información útil de manera rápida.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

$SinAm$

Los efectos de la latitud y el día del año (estación) son evidentes sobre los valores de irradiación colectada diariamente H_{col} , para los distintos valores de d/h . A medida que aumenta el área de colección ($1/2 \rightarrow 1/5 \rightarrow 1/10$), aumentan los valores de irradiación colectados H_{col} . Se puede apreciar en la Fig. 2 que los valores de H_{col} de las tres canopias para el día de invierno ($n = 172$) son casi especulares a los valores para $n = 355$, para cada latitud. Los valores de H_{col} para $n = 264$ son casi constantes para las tres formas, aun variando la latitud.

En la Tabla 1 se detallan los valores astronómicos de duración del día (N) y de máxima altura solar (α) según el día juliano y la latitud.

	Lat. = -60°		Lat. = -40°		Lat. = -20°		Lat. = 0°	
	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)	N (hs)	Max α ($^\circ$)
n = 172	5:30	6,55	9:10	26,55	10:47	46,55	11:59	66,55
n = 264	12:00	30,19	12:00	50,17	12:00	70,13	12:00	88,26
n = 355	18:28	53,44	14:50	73,44	13:12	86,51	11:59	66,55

Tabla 1. Valores de duración del día solar astronómico (N) y máxima altura solar (α) para distintos días del año y para diferentes latitudes.

Puede observarse que en invierno, para las latitudes más australes, la duración del día es menor (horas en que el Sol está sobre el horizonte), y la altura solar es muy baja. A medida que aumenta la latitud (para el mismo día 172), aumenta la cantidad de horas de luz y el ángulo de altura solar. Para el día n 264, asociado a la primavera, el día dura lo mismo para todas las latitudes¹. Pero según la latitud, varía el valor máximo de la altura solar α . Para el día 355 (verano), en la latitud más austral, la duración del día se extiende y el ángulo α es mayor. A medida que la latitud disminuye, lo hace la duración del día e inversamente lo hace α .

Todos estos fenómenos se deben simplemente a que la Tierra tiene inclinado ($23,5^\circ$ aproximadamente), su eje de rotación respecto del plano de la eclíptica.

Se detallarán ahora los resultados respecto de cuál es la estructura que más radiación recibe según latitud y época del año:

- i) En todas las épocas del año, la estructura cónica colecta más energía solar que las demás para Lat. -60° . Para Lat. -40° , la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$ y 264. Para Lat. -20° la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$.
- ii) Para Lat. $= 0^\circ$ la estructura cilíndrica colecta más que las otras dos en todas las estaciones (excepto para $n = 264$ y $d/h = 1/10$, donde la estructura esférica colecta más que las demás).

ConAm

La inclusión de los procesos de atenuación de la irradiancia solar al atravesar la atmósfera implica agregar más variables a tener en cuenta. A priori podemos inferir que, al considerar la interacción de la radiación solar con la atmósfera, el efecto más notable se exprese al amanecer y al ocaso. Esto se debe a que el ángulo con el que inciden los rayos solares hace que casi la totalidad de la irradiancia se atenúe debido a la gran cantidad de masa de aire relativa que deben atravesar.

El modelo de Bird estima el valor la irradiancia total I_T (global), a partir de la adición de la irradiancia directa normal I_{DN} , que atravesó la atmósfera e incide sobre una superficie con la misma dirección que $I_{0,ext}$ (sin atenuar), y la irradiancia solar difusa I_D .

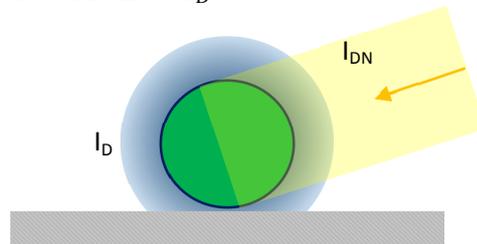


Figura 3. Idealización de la incidencia de la irradiancia solar directa I_{DN} y de la irradiancia solar difusa I_D sobre la canopia esférica para el caso ConAm.

El modelo de Bird define la irradiancia solar difusa solo en el plano horizontal, es decir, paralelo al suelo. La hipótesis es que la radiación difusa, para día de cielo claro, incide de manera paralela a la normal en cada punto de las superficies. Esta hipótesis se abstrae de variaciones producidas por reflexiones, tanto con otras superficies, como de variaciones constitutivas de la atmósfera.

A continuación se mostrarán los efectos que se producen al modificar las variables relacionadas a la transmitancia atmosférica: presión atmosférica, agua precipitable y aerosoles. Las estimaciones se realizarán para un solo día del año (355) y para una sola latitud (-23°). Se mostrarán los efectos que producen variaciones de altitud (a través de modificaciones en la presión atmosférica), cantidad de agua precipitable y turbidez (aerosoles) en el cálculo de la cantidad de energía que colecta una canopia.

En la Tabla 2 se muestran el valor de las variables para cada uno de los seis casos analizados (más el Caso 0). Se analizarán dos altitudes, expresadas como presiones atmosféricas: 0 metros s.n.m. (1013 hPa) y 4000 metros s.n.m. (600hPa). Estas equivalencias se obtienen a partir de información brindada

¹ Ese día se denomina Equinoccio que significa “noche igual”, porque la duración de la noche es igual a la del día (12 hs).

por las tablas de Atmósfera Estándar 1976 (<https://ntrs.nasa.gov/>). La cantidad de agua precipitable representa la cantidad de agua que se obtendría si todo el vapor de agua contenido en una columna vertical de aire con base o sección transversal horizontal unitaria se condensase y precipitase. Para este caso usamos los valores de 4 cm, consistente con un verano suave en Salta Capital ($T = 26^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR} = 70\%$), y un valor extremo de 0 cm (ideal).

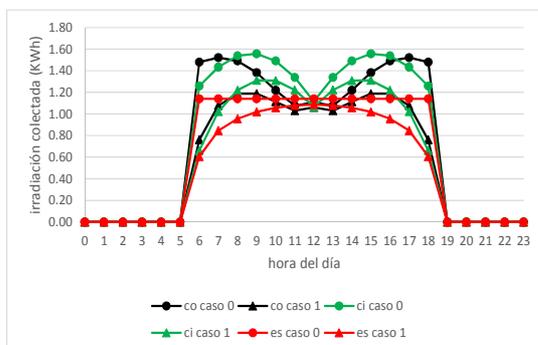
Para el caso de la turbidez, que está asociado a la concentración de aerosoles en la atmósfera, este valor para una atmósfera prístina es aprox. 0,01 (en sitios de gran altura, con ninguna contaminación), mientras que un valor para una atmósfera normal urbana sería de 0,1, como media mensual.

	Patm(hPa)	H ₂ O prec (cm)	Turbidez	Co-SinAm (KWh)	Ci-SinAm (KWh)	Es-SinAm (KWh)	Co-ConAm (KWh)	Ci-ConAm (KWh)	Es-ConAm (KWh)
Caso 1	1013	4	0,01	17,45	18,35	14,84	13,78	14,56	12,21
Caso 2	1013	0	0,01				16,13	17,01	14,27
Caso 3	600	4	0,01				13,97	14,76	12,29
Caso 4	600	0	0,01				16,37	17,26	14,37
Caso 5	600	4	0,1				14,41	15,19	13,11
Caso 6	600	0	0,1				16,84	17,73	15,30

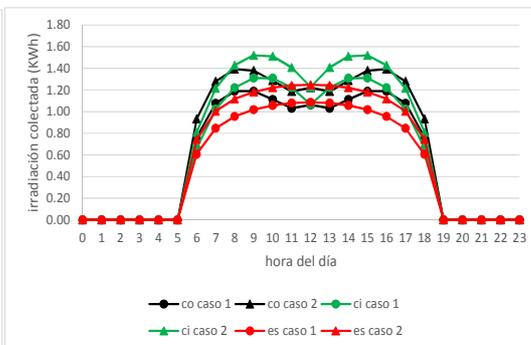
Tabla 2. Descripción de los valores considerados para los seis casos analizados para el día $n=355$ y latitud de -23° . Se muestran también los valores de irradiación colectados por cada canopia en los casos sin atmósfera (SinAm) y con atmósfera (ConAm), para cielo claro.

Básicamente se van cambiando los valores de las variables atmosféricas de manera de evaluar su impacto en la irradiación colectada. Llamaremos Caso 0 a los valores SinAm de la Tabla 2. Así, el Caso 0 respecto del Caso 1 es 21 % mayor para Co y Ci, mientras que es 18 % para Es. Esto puede verse en la Fig. 4i. Estas diferencias se deben a la masa de aire relativa atravesada al inicio y final del día.

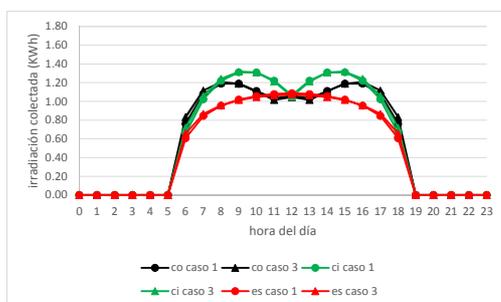
La reducción del vapor de agua (Fig. 4ii) produce una variación de aproximadamente 15 % en la irradiación colectada para todas las canopias. Lo mismo sucede para Fig. 4iv y Fig. 4v. Es decir que el efecto del vapor de agua es importante, cualquiera sea la altitud.



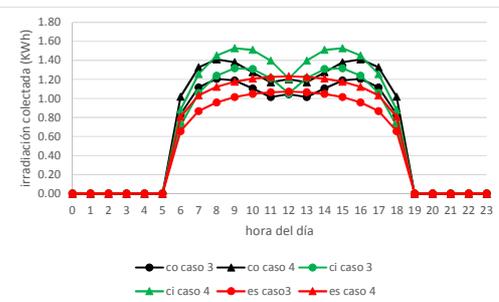
i) Caso 0 vs Caso 1.



ii) Caso 1 vs Caso 2.



iii) Caso 1 vs Caso 3.



iv) Caso 3 vs Caso 4.

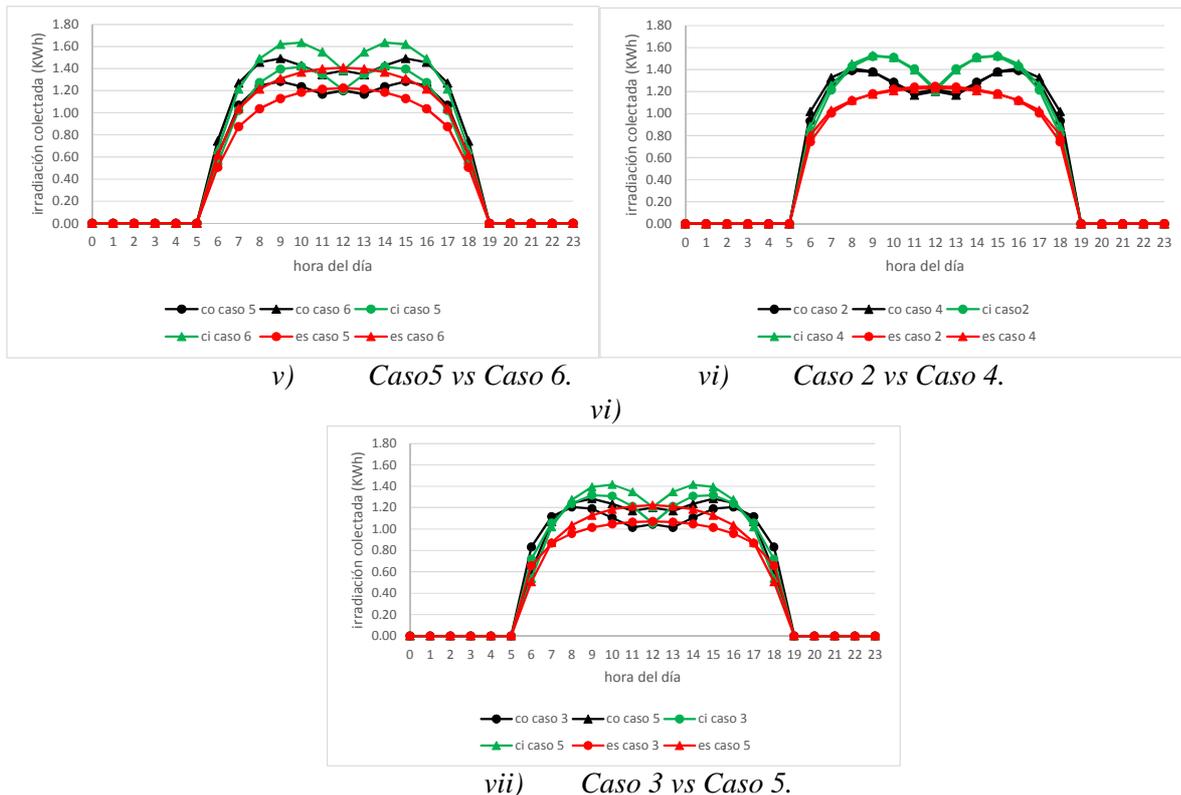


Figura 4. Comparación, en base horaria, de la energía colectada por cada estructura arbórea para distintos casos descritos en la Tabla 2.

Las comparaciones de las Fig. 4iii y 4vi indican que la variación de la altitud tiene efecto despreciable frente a los atribuidos a la variación de la cantidad de vapor de agua. El porcentaje de variación es de 1 % para todas las canopias. Para el caso de la turbidez, resulta notable la variación de irradiación colectada por la esfera (7 %) respecto de las otras (aprox. 4 %). Esta variación se debe posiblemente a la aproximación metodológica usada para calcular la cantidad de irradiancia difusa que llega a las canopias, es decir, no se considera la parte inferior de la pirámide ni del paralelepípedo.

Sin embargo, el efecto de aumentar la altitud afecta los valores de las variables meteorológicas más simples, como la temperatura y la humedad relativa. Esto se debe a que a medida que ascendemos, la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera disminuye. De esa manera, salvo situaciones muy particulares, no será frecuente encontrar a 4000 metros de altura una cantidad de vapor de agua de 4 cm, sino valores menores a 1 cm.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una hoja de cálculo para determinar la cantidad de irradiación solar que llega a canopias arbóreas que se han aproximado a tres cuerpos geométricos sencillos. Los cuerpos geométricos se abstraen utilizando “facetamiento”, salvo en la esfera. Se diferencian dos casos físicos: sin atmósfera (SinAm) y con atmósfera (ConAm) utilizándose el modelo de Bird para este último caso. Se analizaron tres posibles tamaños para este estudio.

Para el caso SinAm, en todas las épocas del año, la estructura cónica colecta más energía solar que las demás para Lat. -60° . Para Lat. -40° , la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$ y 264 . Para Lat. -20° la estructura cónica es la que más colecta para $n = 172$. Para Lat. $= 0^\circ$ la estructura cilíndrica colecta más que las otras dos en todas las estaciones (excepto para $n = 264$ y $d/h = 1/10$, donde la estructura esférica colecta más que las demás).

Para el caso ConAm, se estudia cómo la variación de los factores atmosféricos que atenúan la radiación solar (vapor de agua y aerosoles) influye sobre el valor incidente en la superficie de la canopia. Para el caso testigo se detecta una variación del 15 % para variaciones de vapor de agua y de 7 % a 4 % para el caso de variaciones de turbidez atmosférica. Variaciones de altitud no afectan significativamente, por si solas, la cantidad de radiación que colectan las canopias. En el futuro se

agregaré a este modelo la analogía de transmitancia en medios turbios para simular la cantidad de radiación solar que consigue atravesar una canopia, lo que permitirá determinar cómo afecta a plantas circundantes.

NOMENCLATURA

Variable	Símbolo	Unidad
Irradiancia extraterrestre	$I_{0,ext}$	W/m^2
Ángulo cenital	θ_z	Radianes
Ángulo de incidencia de la irradiancia	θ	Radianes
Constante solar	I_{cs}	W/m^2
Día juliano del año	n	
Latitud	ϕ	Radianes
Declinación del eje terrestre	δ	Radianes
Ángulo horario	ω	Radianes
Inclinación del plano respecto a la horizontal	β	Radianes
Acimut solar	γ_s	Radianes
Acimut del plano receptor	γ	Radianes
Hora Solar	HS	decimal
Irradiancia total	I_T	W/m^2
Irradiación colectada diaria	H_{col}	kWh
Altura solar	α	grados
Irradiancia directa normal	$I_{d\lambda}$	W/m^2
Irradiancia extraterrestre para longitud de onda λ	$H_{0\lambda}$	
Longitud de onda	λ	Nm
Factor de corrección para distancia Tierra-Sol	D	
Factor de dispersión molecular	$T_{r\lambda}$	
Factor de atenuación por aerosoles	$T_{a\lambda}$	
Factor de absorción por el vapor de agua	$T_{w\lambda}$	
Factor de absorción por el ozono	$T_{o\lambda}$	
Factor de absorción por la mezcla uniforme de gases atmosféricos	$T_{u\lambda}$	
Presión corregida de la masa de aire	M	hPa
Presión medida en la superficie	P	hPa
Vapor de agua precipitable	W	cm
Factores de turbidez atmosférica	α_n y β_n	
Coefficiente de absorción de vapor de agua a longitud de onda λ	$\alpha_{w\lambda}$	
Coefficiente de absorción del ozono	$\alpha_{o\lambda}$	
Cantidad de ozono	O_3	Atm.cm
Masa del ozono	M_o	
Altura de la máxima concentración de ozono	h_o	km
Coefficiente que combina absorción y cantidad de gases	$\alpha_{u\lambda}$	
Irradiancia difusa	$I_{s\lambda}$	W/m^2
Dispersión de Rayleigh	$I_{r\lambda}$	
Dispersión por aerosoles	$I_{a\lambda}$	
Suma de reflexión de la irradiancia por la superficie y el aire	$I_{g\lambda}$	
Transmitancia de la absorción de aerosoles	$T_{aa\lambda}$	
Transmitancia de la dispersión de los aerosoles	$T_{as\lambda}$	
Fracción de la dispersión por aerosoles	F_s	
Albedo superficial para la longitud de onda λ	$r_{s\lambda}$	
Reflectividad del cielo para la longitud de onda λ	$r_{g\lambda}$	

REFERENCIAS

- Badescu, V. (2008). *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. Recent Advances*. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Barillot, R., Louarn, G., Escobar-Gutiérrez, A., Huynh, P. Combes, D. (2011). How Good Is the Turbid Medium-Based Approach for Accounting for Light Partitioning in Contrasted Grass-Legume Intercropping Systems? *Annals of Botany* 108 (6): 1013-24.
- Bird, R. y Hulstrom, R. (1981). *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*. Solar Energy Research Institute. Golden, Colorado.
- Campillo, C. Fortes, R. Prieto, M. (2012). *Solar Radiation Effect on Crop Production*, Solar Radiation, Prof. Elisha B. Babatunde (Ed.).
- Duffie, J. A. y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley.
- Gueymard C. (1995). SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Florida Solar Energy Center. University of Central Florida.
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface - Elements of a model. *Solar Energy*, Vol. 20. pp. 143-150. Pergamon Press.
- Maddoni, G.A., Chelle, M., Drouet, J.-L., Andrieu, B. (2001). Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. *Field Crops Research* 70. pp. 1-13.
- Monsi, M., y Saeki, T. (1953). The light factor in plant communities and its significance for dry matter production. *Japanese Journal of Botany*, 14(1), 22-52.
- Myneni, R.B., R. Ramakrishna, R. Nemani, y S.W. Running. (1997). Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35 (6): 1380-93.
- <https://ntrs.nasa.gov/>. Tablas de Atmósfera Estándar 1976. NASA Technical Reports Server.
- Watson, D.J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany, New Series*, Vol. 11, No. 41, pp. 41-76
- Yang, K, Huang GW, Tamai N (2001) A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70 (1),pp 13-22.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONICET por el otorgamiento de una Beca Doctoral para Temas Estratégicos 2017 al Ing. Diego Salve.

ABSTRACT: The effect of solar radiation on plants has been widely investigated worldwide. Several models have been developed to simplify the necessary calculations to know in detail the interaction of the radiation and the vegetal canopy. In this work a model was developed using universal factors and coefficients, which allows simulating the amount of solar radiation that can collect 3 geometric bodies which represent different canopies in any part of the year and in any latitude. The effect produced by the atmosphere on the incident radiation and on the collection made by these bodies was achieved through the application of Bird's clear sky day model. Although it is a simple model, the results obtained are of great interest to understand the spatial distribution and efficiency in the collection of solar radiation associated with different plant architectures.

Keywords: Solar radiation, simulation, canopy, geometric bodies, collection, Bird.