



Radiación extraterrestre sobre una superficie inclinada en función de la latitud, la declinación solar y las características de la pendiente

Apellidos, nombre	Bautista Carrascosa, Inmaculada (ibautista@qim.upv.es)
Departamento	Química
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se exponen los conceptos teóricos que describen el efecto de la orientación e inclinación de una superficie sobre la radiación incidente en la parte exterior de la atmósfera. Se presentan los procedimientos de cálculo de la radiación extraterrestre incidente sobre superficies inclinadas, en función de la situación geográfica y la fecha. También se compara la variación anual de la radiación incidente sobre una superficie en pendiente respecto a la que incide sobre una superficie horizontal. El comportamiento de estas variables se puede representar gráficamente mediante distintos laboratorios virtuales disponibles en Riunet.

Laboratorios virtuales disponibles
1. Altura solar
2. Radiación solar extraterrestre
3. Radiación extraterrestre sobre superficies inclinadas
4. Proporción anual de radiación solar extraterrestre en superficies inclinadas

Tabla 1. Laboratorios virtuales disponibles.

2 Introducción

Aunque los climas terrestres están determinados fundamentalmente por la latitud, a escala local y regional se pueden producir diferencias climáticas importantes. Las variaciones topográficas en la pendiente del terreno producen diferencias en radiación solar incidente debido a que existen áreas expuestas directamente a la radiación solar y áreas sombreadas (figura 1). Las variaciones topográficas pueden provocar diferencias locales en radiación solar equivalentes a las de decenas de grados de latitud.



Figura 1. Efecto de la pendiente en la radiación solar incidente. La imagen muestra superficies que no reciben radiación solar directa.

3 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, el alumno será capaz de:

- Obtener la radiación extraterrestre incidente sobre una superficie inclinada en cualquier ubicación geográfica y día del año, en función del azimut y la inclinación de la pendiente.
- Comparar la radiación extraterrestre incidente sobre superficies inclinadas con la radiación incidente sobre la superficie horizontal.

4 Desarrollo

4.1 Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre superficies inclinadas

La inclinación y orientación de la pendiente y la latitud interaccionan con la fecha del año y la hora del día para producir patrones muy complejos de radiación incidente.

La radiación que se recibe sobre una superficie inclinada viene determinada por el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre esa superficie. Depende tanto del **ángulo de la pendiente(s)** y la orientación de la misma como de la trayectoria solar (figura 2).

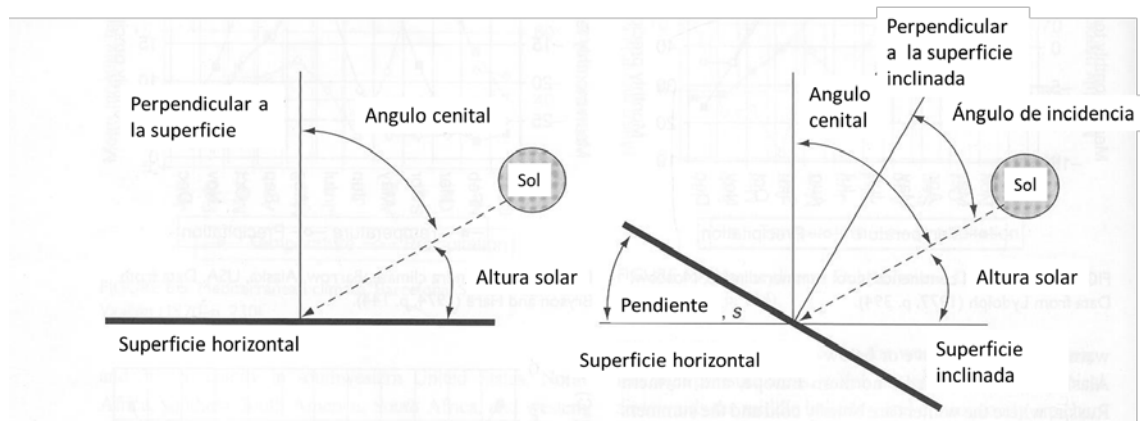


Figura 2. Altura solar, ángulo cenital y ángulos de incidencia sobre una superficie horizontal (izquierda) y sobre una superficie inclinada (derecha).

La intensidad de radiación que se recibe sobre una superficie es máxima cuando esta es perpendicular a los rayos solares. Para una superficie horizontal los rayos solares son perpendiculares a la misma cuando la altura solar vale 90° . Cuando es distinta de 90° , la cantidad de radiación que recibe la superficie es igual a la máxima multiplicada por el seno de la altura solar o el coseno del ángulo cenital. Cuando el sol está bajo y su altura solar forma un ángulo muy pequeño, como sucede, por ejemplo, al amanecer o al atardecer, la intensidad de radiación recibida por la superficie es muy pequeña. La evolución de la altura solar para a lo largo del día se puede calcular a través del laboratorio virtual 'Altura solar' disponible en Riunet: (<https://riunet.upv.es/handle/10251/30864>)

En cambio, si la superficie está inclinada, es necesario tener en cuenta la inclinación de la superficie. Definimos el **ángulo de incidencia**, i , como el ángulo que forman los rayos del sol y una línea imaginaria perpendicular a la pendiente (figura 3).

La proyección de la perpendicular a la pendiente sobre el plano horizontal constituye el **acimut de la pendiente** e indica la dirección hacia la que está orientada ésta. Su valor es el ángulo expresado en grados comprendido entre la línea proyectada sobre el plano horizontal y la dirección norte. Por ejemplo, si la pendiente está orientada al norte su acimut vale 0° , si la pendiente está orientada al sur su acimut vale 180° .

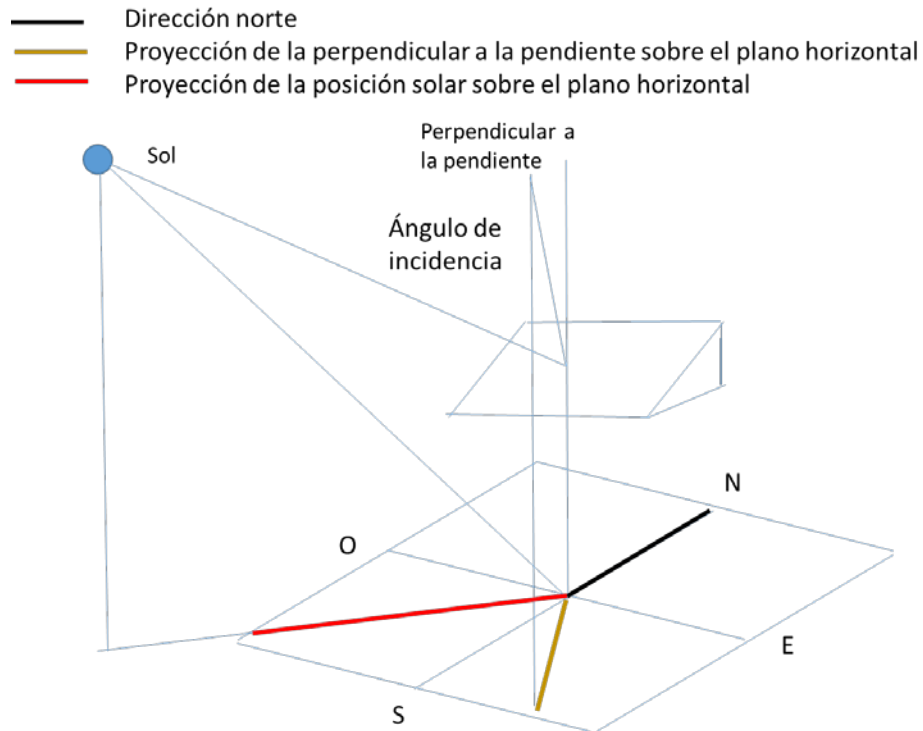


Figura 3. Acimut del sol (ángulo que forma la proyección de la posición solar sobre el plano horizontal y la dirección norte) y acimut de la pendiente (ángulo que forma la proyección de la perpendicular a la pendiente sobre el plano horizontal y la dirección norte)

El ángulo de incidencia varía a lo largo del día (figura 3) conforme el sol recorre su trayectoria sobre el horizonte. Su valor viene dado por la siguiente ecuación

$$\cos i = \cos s * \sin \alpha + \sin s * \cos \alpha * \cos (A_{\text{sol}} - A_{\text{pendiente}})$$

Donde s es el ángulo de la pendiente,

α es la altura solar ,

A_{sol} es el acimut del sol (ángulo formado por la proyección de los rayos solares sobre el plano horizontal con la dirección norte. Su valor varía entre 0° (norte) y 360°).

$A_{\text{pendiente}}$ es el acimut de la pendiente.

4.2 Radiación extraterrestre incidente sobre superficies inclinadas

La **radiación solar extraterrestre que se recibe sobre la pendiente** está relacionada con el **parámetro solar S_0** , o densidad de flujo de radiación que se recibe sobre una superficie perpendicular a los rayos solares a través de ángulo de incidencia i .

$$S_p = S_0 \cos i$$

Para un día dado del año, la expresión del parámetro solar es:

$$S_0 = 1367 \left(\frac{\bar{d}}{d} \right)^2 \text{ Wm}^{-2}$$

donde: \bar{d} = distancia media de la Tierra al Sol, y d = distancia de la Tierra al Sol, para ese día .

¿Cómo podemos conocer la radiación que se recibe sobre superficies inclinadas?

Se ha elaborado un laboratorio virtual denominado **Radiación solar extraterrestre sobre superficies inclinadas**, que se encuentra disponible en Riunet y permite obtener la curva diaria de variación de la radiación solar extraterrestre incidente sobre una superficie de pendiente variable, en función de la ubicación geográfica y la fecha.

Los datos de entrada para este laboratorio son la latitud expresada en grados (se considera positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur) y la fecha expresada como mes y día. Los datos que necesitamos de la pendiente son su inclinación, expresada en grados y su orientación (acimut) expresada en grados y medida respecto a la dirección norte. Este laboratorio permite comparar los efectos de distintas orientaciones de la pendiente sobre la radiación solar incidente.

Por ejemplo, la radiación que se recibe sobre una superficie horizontal en la parte exterior de la atmósfera sobre un punto situado a 40 ° de latitud norte el día del solsticio de verano sería:

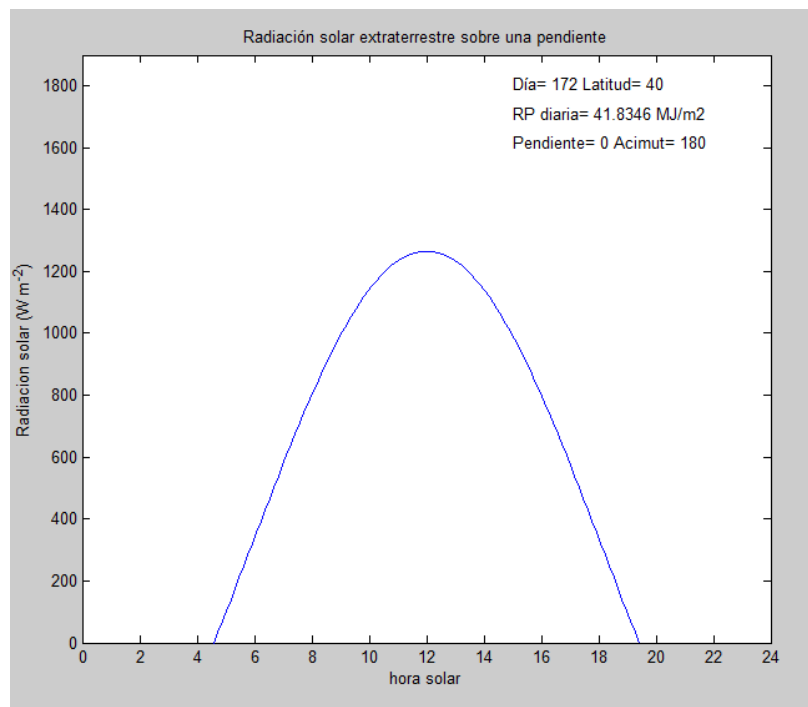


Figura 4. Evolución diaria de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal el día 21 de junio en un punto situado a 40 ° de latitud.

Si la superficie está inclinada con un ángulo de 30° y orientada al sur la curva sería:

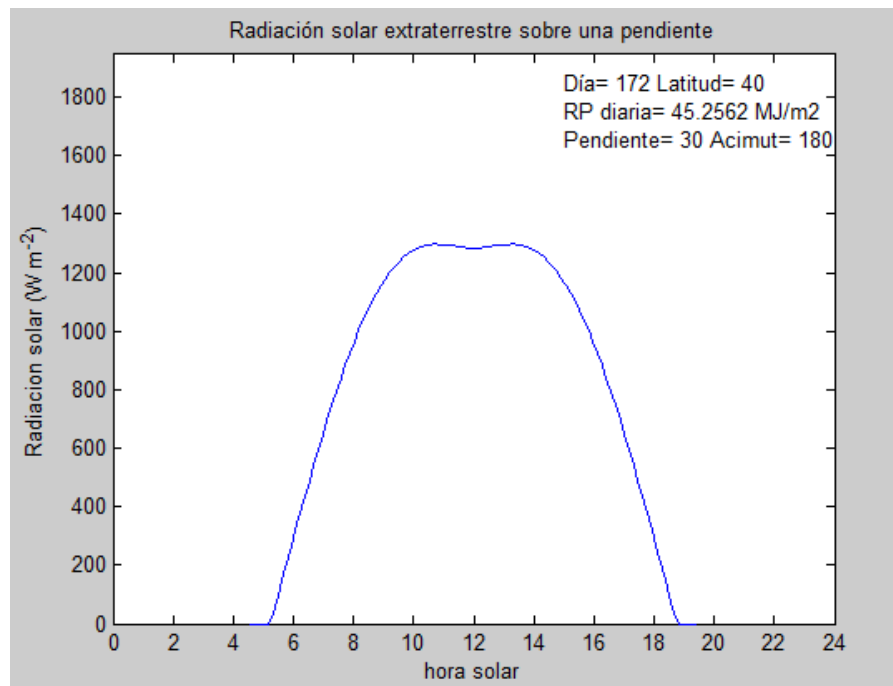


Figura 5. Evolución diaria de la radiación solar extraterrestre el día 21 de junio sobre una superficie inclinada 30° , orientada al sur y ubicada a 40° de latitud norte.

Si en cambio la superficie inclinada 30° estuviera orientada al norte, la radiación que se recibiría en la parte exterior de la atmósfera a lo largo del día se observa en la figura 6.

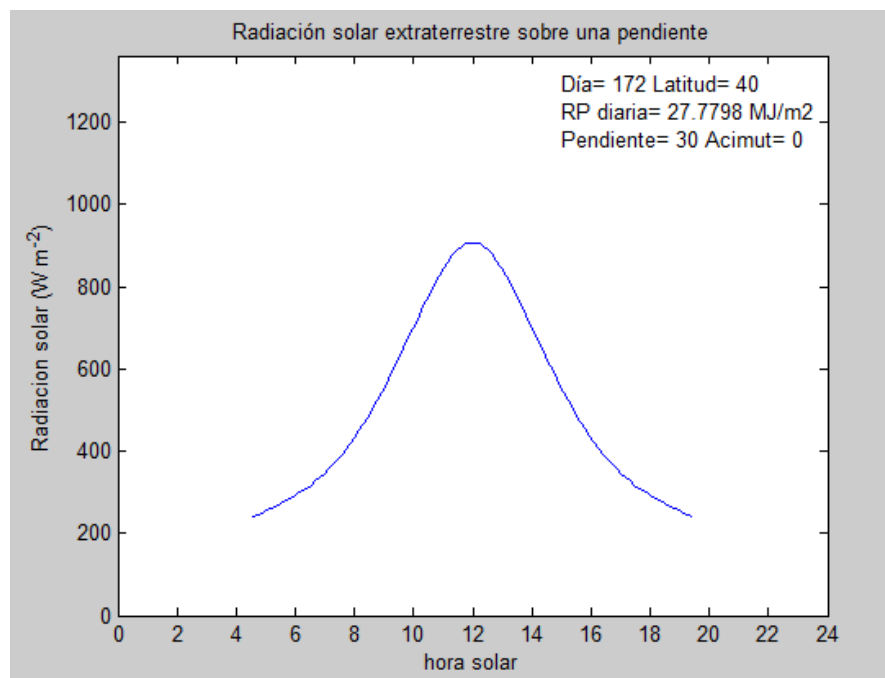


Figura 6. Evolución diaria de la radiación solar extraterrestre el día 21 de junio sobre una superficie inclinada 30° , orientada al norte y ubicada a 40° de latitud norte.

Al comparar las figuras 4, 5 y 6 se pueden detectar varios efectos relacionados con la pendiente sobre la radiación solar incidente. Cuando el sol incide sobre pendientes orientadas al sur en el solsticio de verano, el tiempo de incidencia es menor que sobre superficies horizontales, pero la radiación incidente en las horas centrales del día se mantiene muy alta, dando como resultado mayor radiación solar diaria sobre la pendiente orientada al sur que sobre la superficie horizontal. En cambio, cuando la pendiente está orientada al norte, para esta fecha y latitud concretas, recibe radiación las mismas horas que la superficie horizontal pero los valores de la radiación incidente son mucho más bajos. Si comparamos la radiación extraterrestre diaria entre las pendientes norte y sur, vemos que en la orientada al sur es casi el doble de la orientada al norte.

4.3 Radiación incidente sobre superficies inclinadas respecto a la incidente sobre superficies horizontales

Conforme la radiación solar atraviesa la atmósfera, es en parte absorbida, principalmente por el vapor de agua y las nubes, y en parte dispersada hacia todas las direcciones por las nubes, los gases de la atmósfera y las partículas suspendidas en el aire. La radiación que se recibe en la parte superior de la atmósfera se atenúa al atravesarla. La **transmitancia atmosférica** (proporción de radiación que atraviesa la atmósfera) varía típicamente entre 0,6 y 0,7 en días sin nubes.

Aunque la transmitancia atmosférica varía con la nubosidad y la inclinación de los rayos solares y estos valores no son constantes a lo largo del día, el efecto que tiene la pendiente sobre la incidencia de los rayos solares en la parte exterior de la atmósfera, va a condicionar la radiación incidente en la superficie terrestre, especialmente en climas con una gran cantidad de horas de sol.

Para comparar la evolución anual de la radiación solar incidente en superficies inclinadas respecto a superficies horizontales se ha elaborado el laboratorio virtual "Proporción anual de radiación solar extraterrestre en superficies inclinadas".

Las figuras 7 y 8 muestran los patrones anuales de comparación de la radiación incidente sobre paredes verticales respecto a la radiación incidente en una superficie horizontal para un punto situado a 40° N. En otoño e invierno, la pared orientada al sur recibe más radiación que la superficie horizontal (figura 7), debido a que el sol está bajo sobre el horizonte. En cambio, en primavera y verano esta orientación recibe menos radiación que la superficie horizontal.

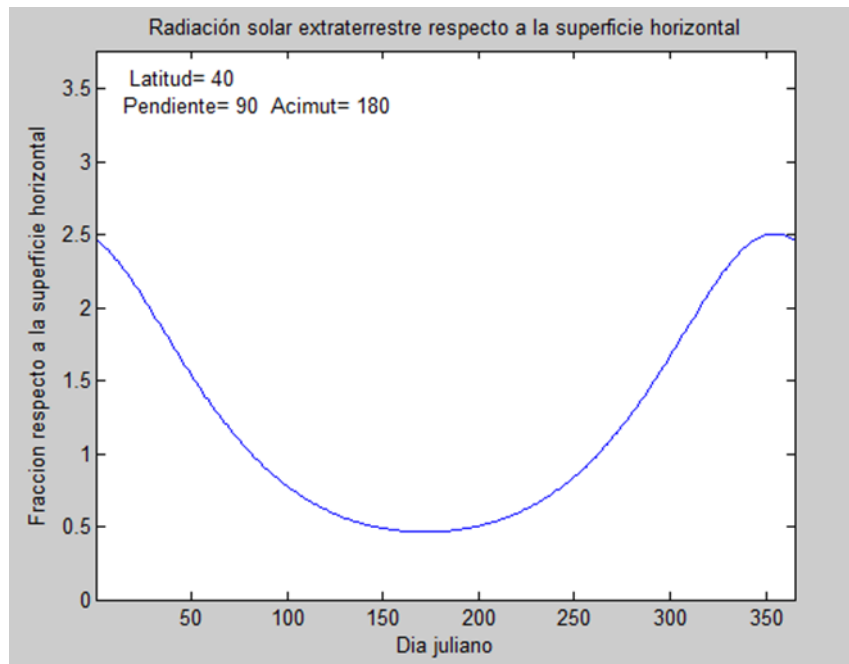


Figura 7. Evolución anual de la radiación comparada de una superficie vertical, orientada al sur y situada a 40° N de latitud.

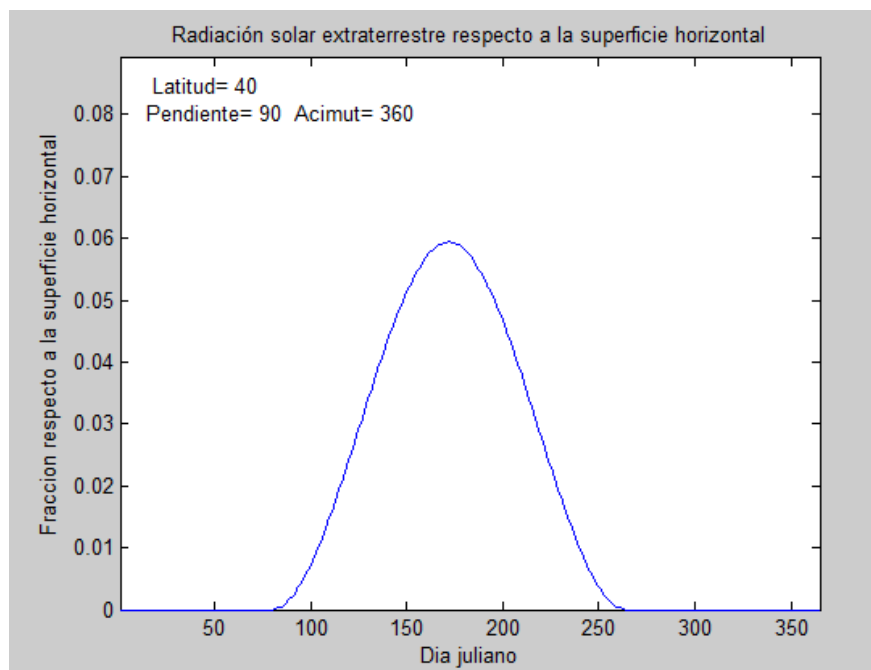


Figura 8. Evolución anual de la radiación comparada de una superficie vertical, orientada al norte y situada a 40° N de latitud.

La pared orientada al norte no recibe radiación solar directa en otoño e invierno (figura 8). En cambio, recibe una pequeña proporción de radiación solar en verano, a primeras horas de la mañana y a últimas horas de la tarde.

La orientación de la pendiente es fundamental en el balance térmico, especialmente a latitudes altas.

5 Cierre

La interacción entre superficies de distintas orientaciones con la latitud y la fecha del año produce un patrón complejo de radiación solar directa incidente sobre estas superficies, que impide la extrapolación de cálculos energéticos entre diferentes latitudes. A efectos de planificación de recursos y de cálculos energéticos resulta muy interesante comparar la evolución anual de la radiación solar incidente en superficies inclinadas respecto a superficies horizontales.

6 Bibliografía

Bautista Carrascosa, I.; "Altura solar" (2013). Uso de licencias abiertas CC en Riunet. Disponible en: <http://labmatlab.upv.es/eslabon/as2013ibc/>

Bautista Carrascosa, I.; Damián Ginestar Peiró. "Radiación solar extraterrestre", 2016. Aceptado.

Bautista Carrascosa, I.; Damián Ginestar Peiró. "Radiación extraterrestre sobre superficies inclinadas", 2016.

Bautista Carrascosa, I.; Damián Ginestar Peiró. "Proporción anual de radiación solar extraterrestre en superficies inclinadas", 2016.

Bonan, G; "Ecological climatology. Second edition", Ed. Cambridge University Press, 2008, pág. 71-80.

Llorca Llorca, R ; Bautista Carrascosa, I.: "Prácticas de atmósfera, suelo y agua", Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2006, pág. 15-21.