

# Radiación solar fuera de la atmósfera (TOA)



## Fundamentos del Recurso Solar 2024

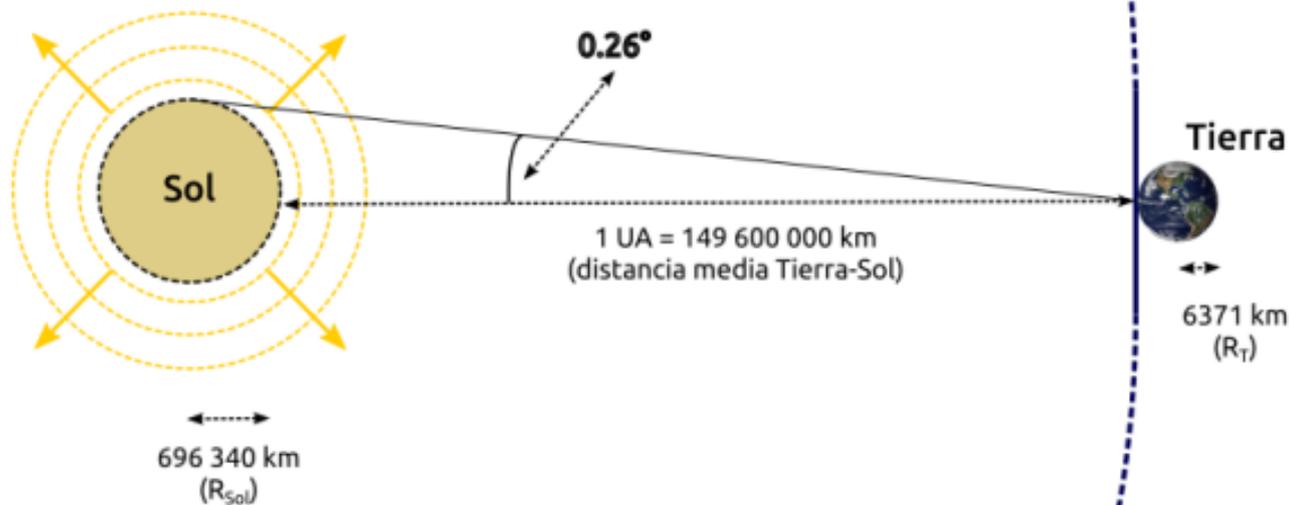
Laboratorio de Energía Solar  
FING | CENUR-LN  
Universidad de la República

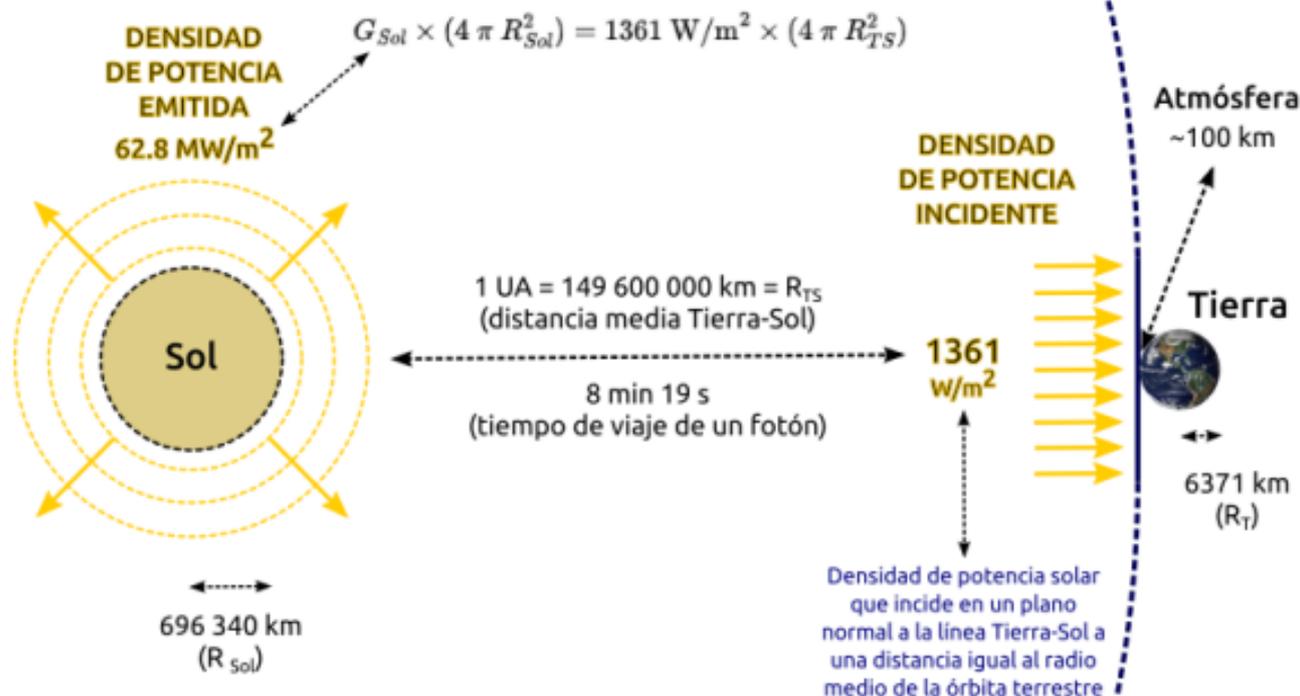
Rodrigo Alonso-Suárez  
[r.alonso.suarez@gmail.com](mailto:r.alonso.suarez@gmail.com)

## DISTANCIAS INVOLUCRADAS

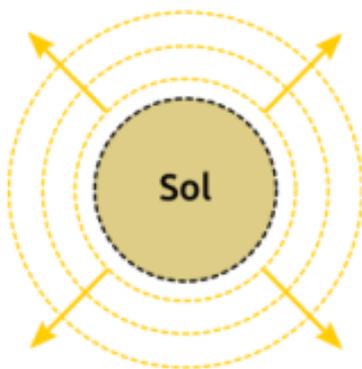


**EL SOL VISTO DESDE LA TIERRA FUERA DE LA ATMÓSFERA ES UN PUNTIITO**





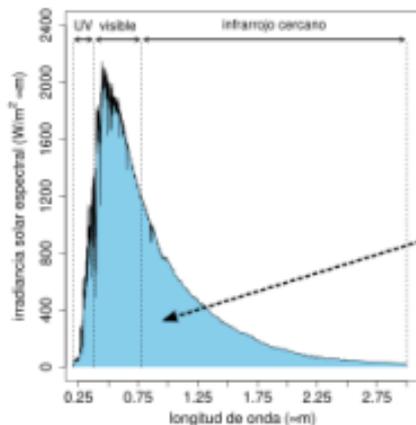
## EL SOL EMITE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA COMO UN CUERPO NEGRO A UNA $T_s \sim 5770 \text{ K}$



### Ley de Stefan–Boltzmann

$$P/A = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$



Espectro solar estándar  
fuera de la atmósfera  
a una distancia de 1 UA  
ASTM E490

DENSIDAD  
DE POTENCIA  
INCIDENTE

1361  
 $\text{W/m}^2$



Tierra

## UN POCO DE TERMINOLOGÍA ...

**Radiación solar:** término genérico utilizado para la transferencia radiante Tierra-Sol.

**Irradiancia solar:** potencia solar *incidente* por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

**Irradiancia solar espectral:** irradiancia solar por unidad de longitud de onda ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{um}$ ).

**Irradiación solar:** energía solar *incidente* por unidad de área ( $\text{J}/\text{m}^2$  ó  $\text{Wh}/\text{m}^2$ ).

**Irradiación solar espectral:** irradiación solar por unidad de longitud de onda ( $\text{J}/\text{m}^2 \text{um}$ ).

$$\text{irradiacion} = \int_{\Delta t} \text{irradiancia} dt$$

## NOMENCLATURA ...

Irradiancia solar

$G$

Irradiación solar **horaria**

$I$

$I_{\lambda}$

Irradiancia solar espectral

$G_{\lambda}$

Irradiación solar **diaria**

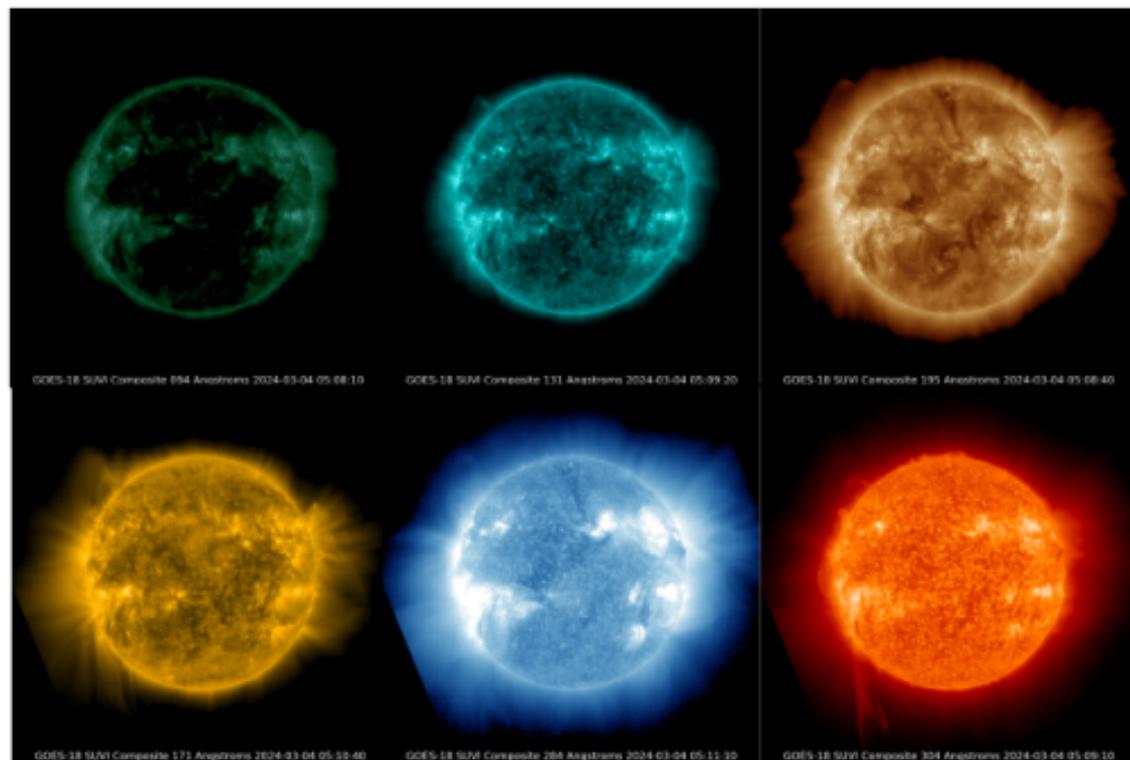
$H$

$H_{\lambda}$

total    espectral

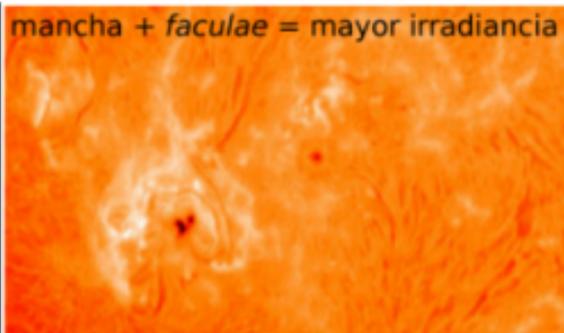
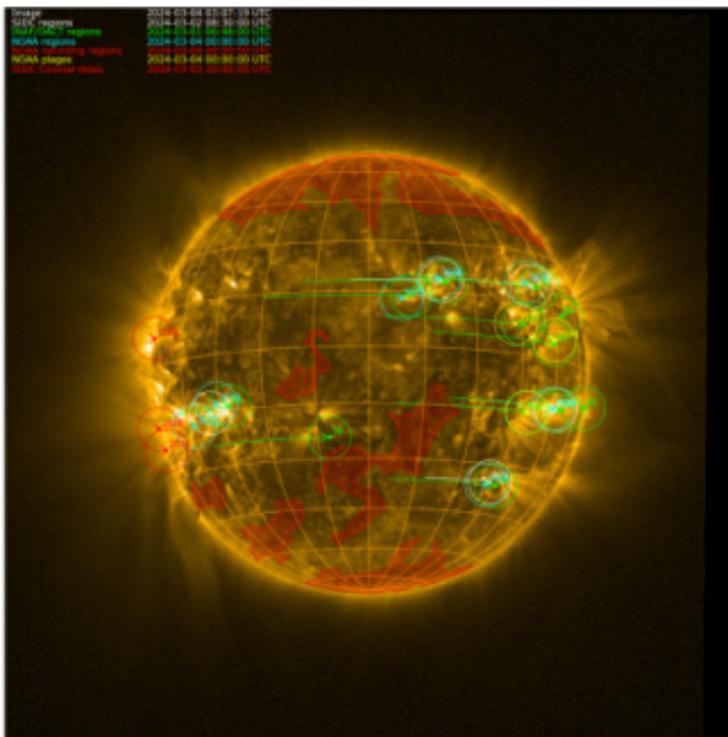


## MONITOREO CONTINUO DEL SOL - SPACE WEATHER

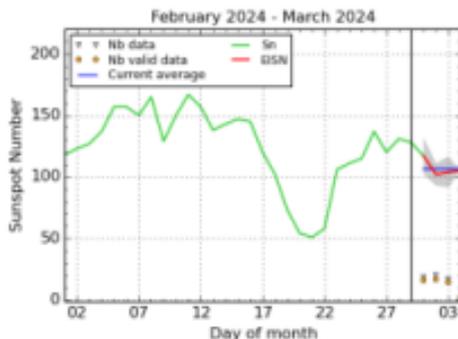


<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-images/goes.html>

# MONITOREO CONTINUO DEL SOL - SPACE WEATHER



detalle de mancha solar, rodeada de *faculae*

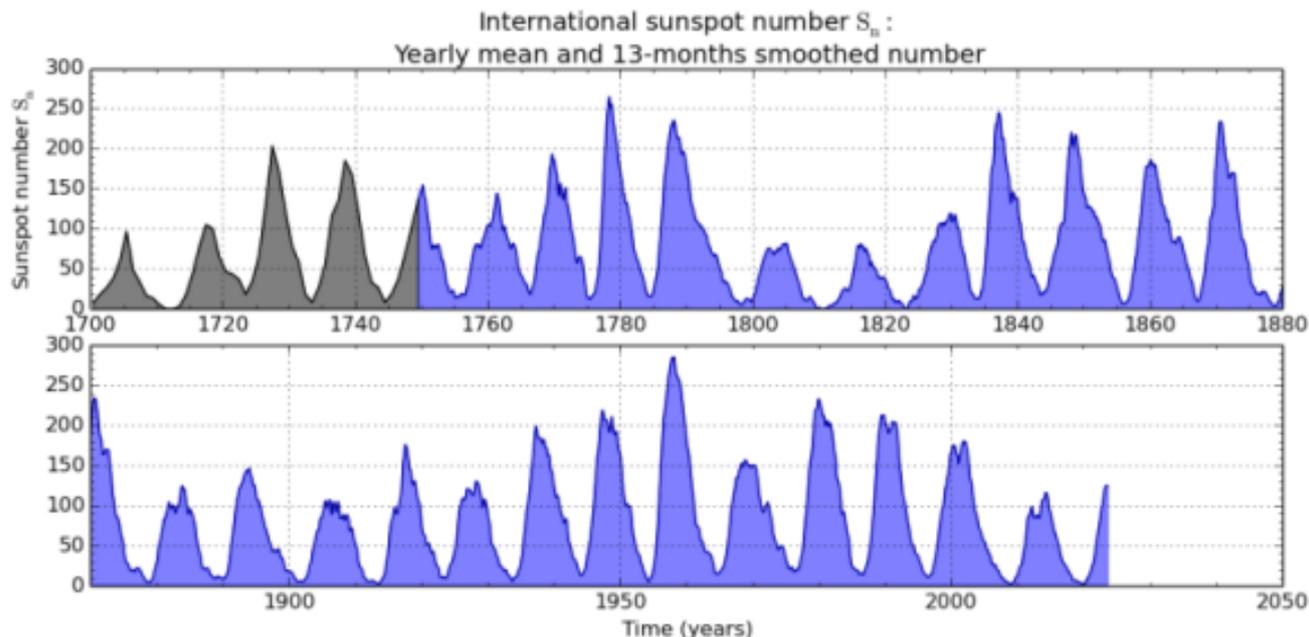


SILSO graphics (<http://sido.berkeley.edu/>) Royal Observatory of Belgium, 2024 March 4

[https://www.youtube.com/watch?v=6tmbelLTHC\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=6tmbelLTHC_0) <https://www.sidc.be/spaceweatherservices/applications/solarmap/>

## MONITOREO HISTÓRICO DEL SOL - ACTIVIDAD SOLAR

- annual numbers 1700-present; **monthly numbers 1749-present**
- daily values 1818-present; and sunspot numbers by north and south hemisphere

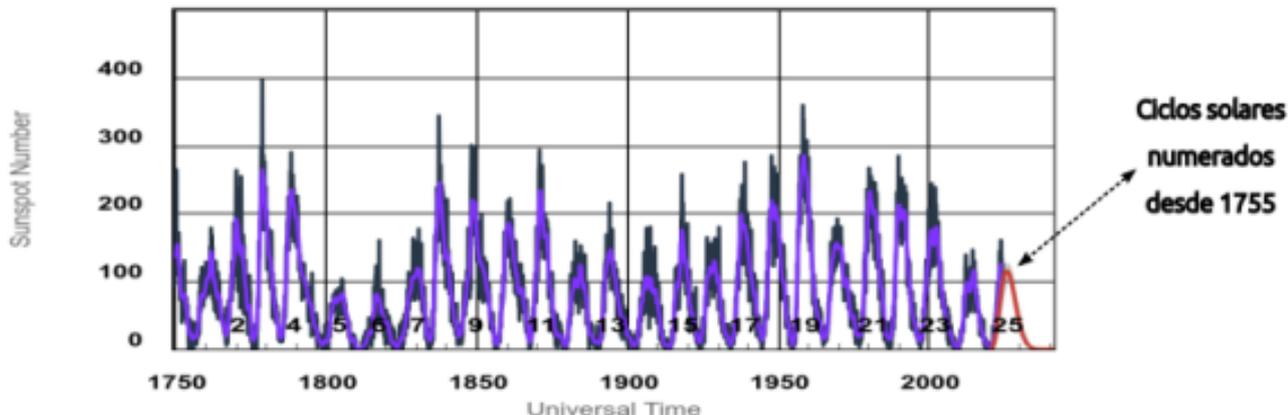


SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2024 March 1

# MONITOREO HISTÓRICO DEL SOL - ACTIVIDAD SOLAR

## ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

Zoom:

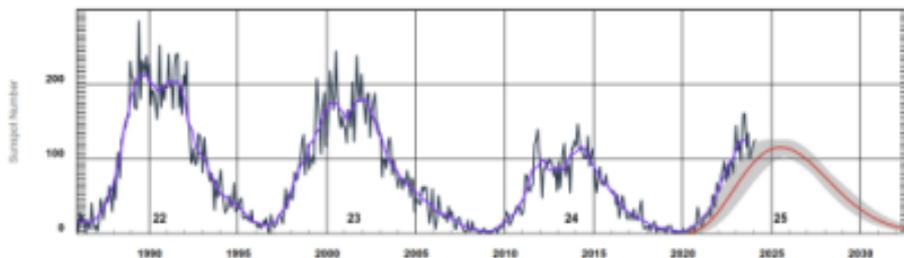
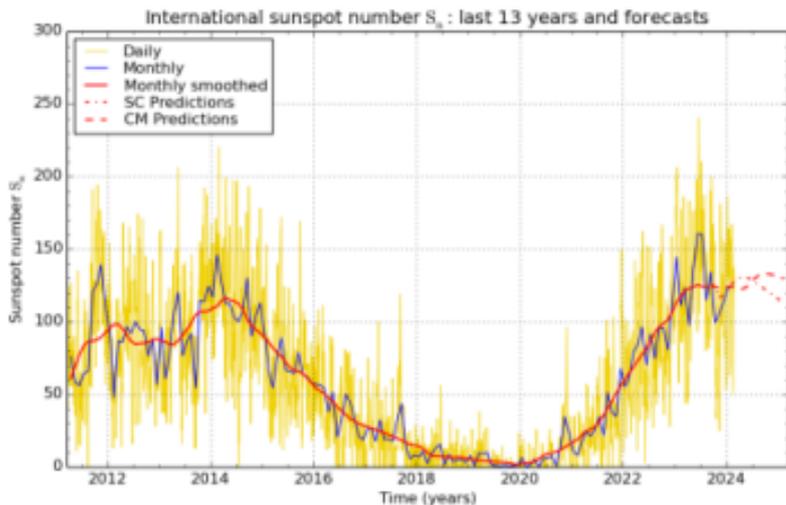


◆ Monthly Values   
 — Smoothed Monthly Values   
 — Predicted Values  
▬ Predicted Range

Space Weather Prediction Center

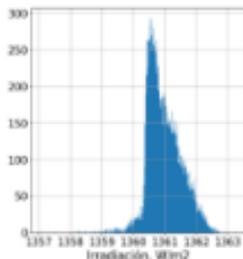
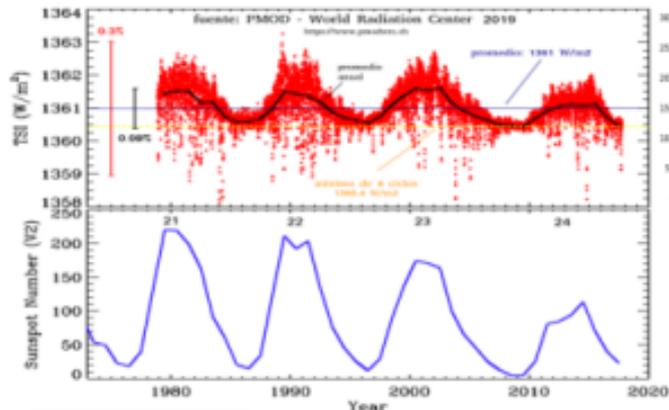
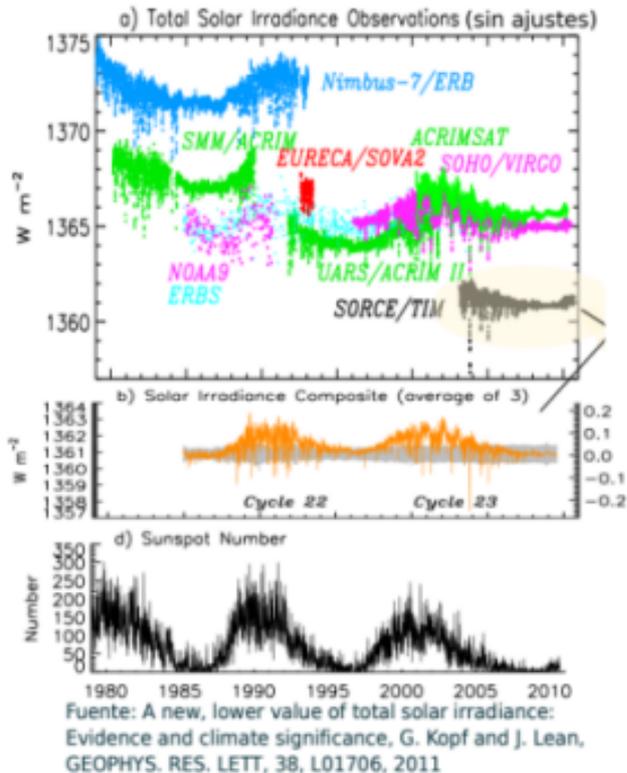
<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

## MONITOREO HISTÓRICO DEL SOL - ACTIVIDAD SOLAR



## TOTAL SOLAR IRRADIANCE (TSI) -> ¿Cuánta irradiancia llega al TOA?

- Distintas misiones satelitales han monitoreado este valor
- Medir con precisión este valor no es sencillo.



VALOR PROMEDIO DE LA TSI ( $G_s$ )  
 Y SU INCERTIDUMBRE P95

$$G_s = 1361 \pm 1 \text{ W/m}^2$$

(valor a una distancia de 1 UA del Sol)

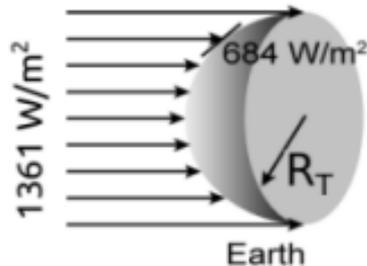
## TOTAL SOLAR IRRADIANCE (TSI) -> ¿Cuánta irradiancia llega al TOA?

proyectando sobre plano horizontal:

$$\bar{G} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega_0} G_s \cos \theta d\Omega = \frac{1}{2} G_s \approx 681 \text{ W/m}^2$$

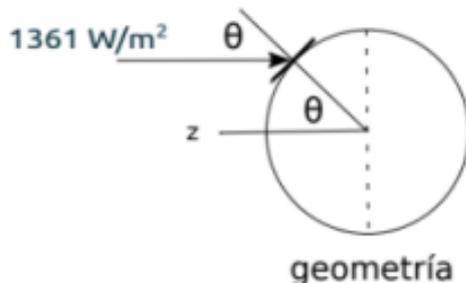
o también (promedio en la cara terrestre "al Sol")

$$\bar{G} = \frac{\text{energía incidente}}{\text{area}} = \frac{G_s \times \pi R_T^2}{2\pi R_T^2} = \frac{1}{2} G_{cs}$$



La potencia solar incidente en un momento dado sobre la Tierra es grande:

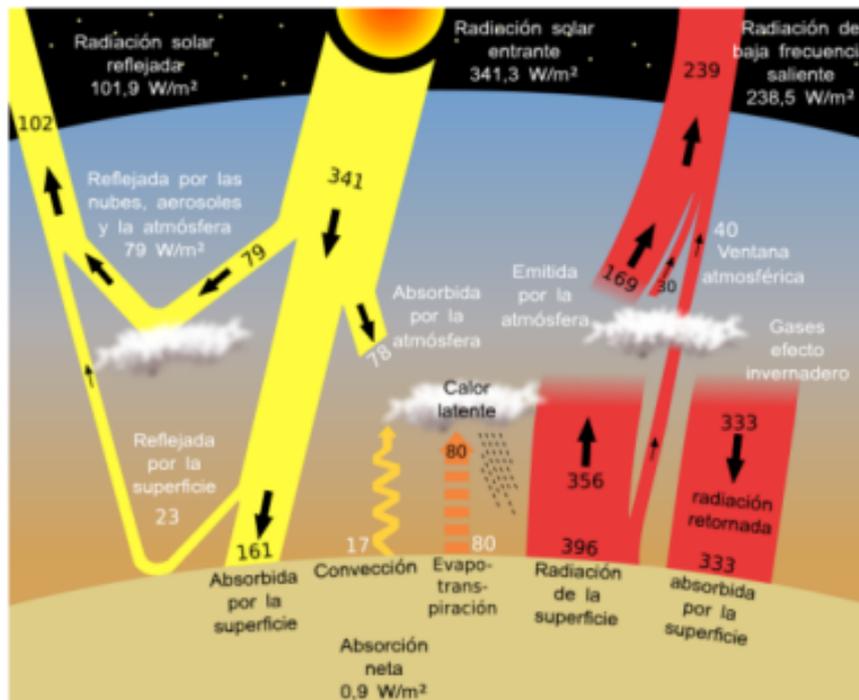
$$P = G_s \times \pi R_T^2 \simeq 176 \text{ pW}$$



equivale a unas 2000 plantas térmicas o centrales nucleares de 88 MW c/u.

## TOTAL SOLAR IRRADIANCE (TSI) -> ¿Cuánta irradiancia llega al TOA?

- Balance radiativo de la Tierra: la TSI es la radiación solar entrante -> ¿Cómo?



$$G_{ave} = \frac{G_s \pi R_T^2}{4 \pi R_T^2}$$

$$= \frac{G_s}{4}$$

$$\approx 340 \text{ W/m}^2$$

- De todo este asunto, nosotros vamos a estudiar solo lo que ocurre con la radiación solar (en la región del espectro solar)

- Se le llama radiación de onda corta (entre 200-4000 nm)

**SOLAR**  
**25000 TW-año**  
 por año



2050

27 TW-año  
 por año

TODAS LAS RESERVAS DE COMBUSTIBLES  
 FÓSILES REPRESENTAN ~6% DE LO QUE  
 EL SOL ENTREGA EN UN AÑO

HAY ~1000 VECES MÁS  
 ENERGÍA SOLAR DISPONIBLE  
 QUE EL CONSUMO ANUAL  
 DE TODO EL PLANETA



2015

18.5 TW-año  
 por año

**EL POTENCIAL SOLAR  
 ES EL MAYOR  
 DISPONIBLE**

**Demanda mundial:**  
 2015: 18.5 TW-año/año

**Renovables (por año):**  
 \* Máximo estimado

<b>Solar:</b>	<b>25 000 TW-año/año</b>
Eólica *	130 TW-año/año
OTEC :	11 TW-año/año
Biomasa :	6 TW-año/año
Hidro:	4 TW-año/año
Geotérm. :	3 TW-año/año
Olas :	2 TW-año/año
Mareas:	0.3 TW-año/año

**No Renovables (total):**  
 reservas conocidas

Carbón:	830 TW-año
Petróleo:	335 TW-año
Gas Natural:	220 TW-año
Uranio:	185 TW-año

830 TW-año  
 total



335 TW-año  
 total



220 TW-año  
 total



185 TW-año  
 total

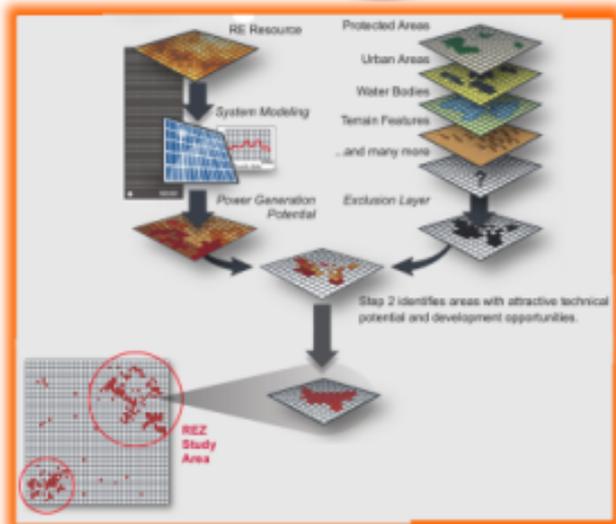
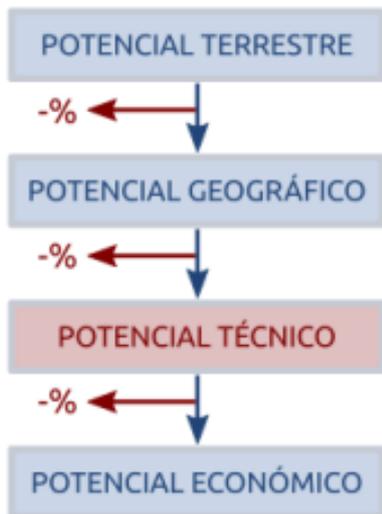


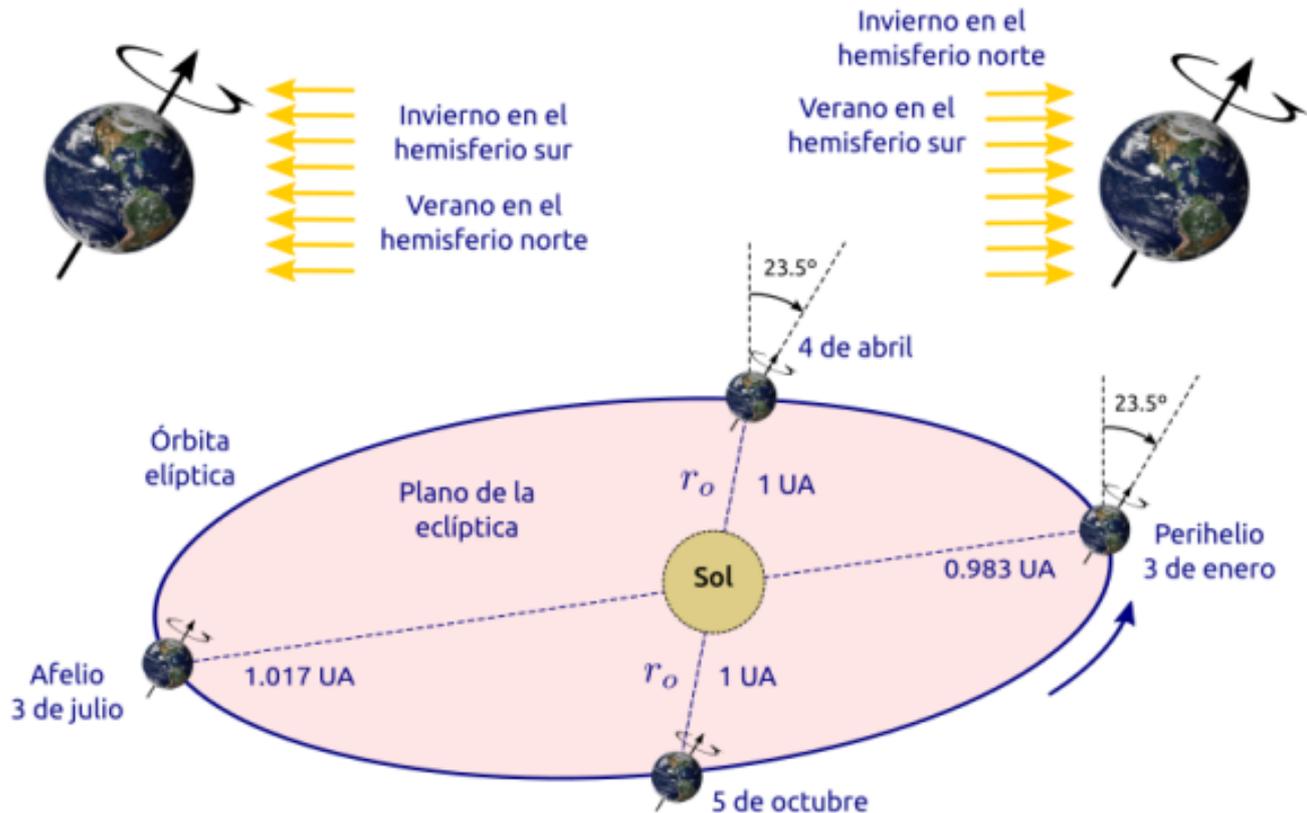
## POTENCIAL GLOBAL DE RENOVABLES



TW-año por año	IRENA (2004)	diferentes estudios
SOLAR	55	2 - 85
EÓLICA	20	1 - 20
GEOTÉRMICA	165	1 - 1000
HIDRO	2	1 - 3
BIOMASA	8	1 - 50
OLAS/MAREAS	1	0.1 - 1

250 TW-año





Se debe cumplir:  $4\pi r^2 G_o = 4\pi r_o^2 G_s$

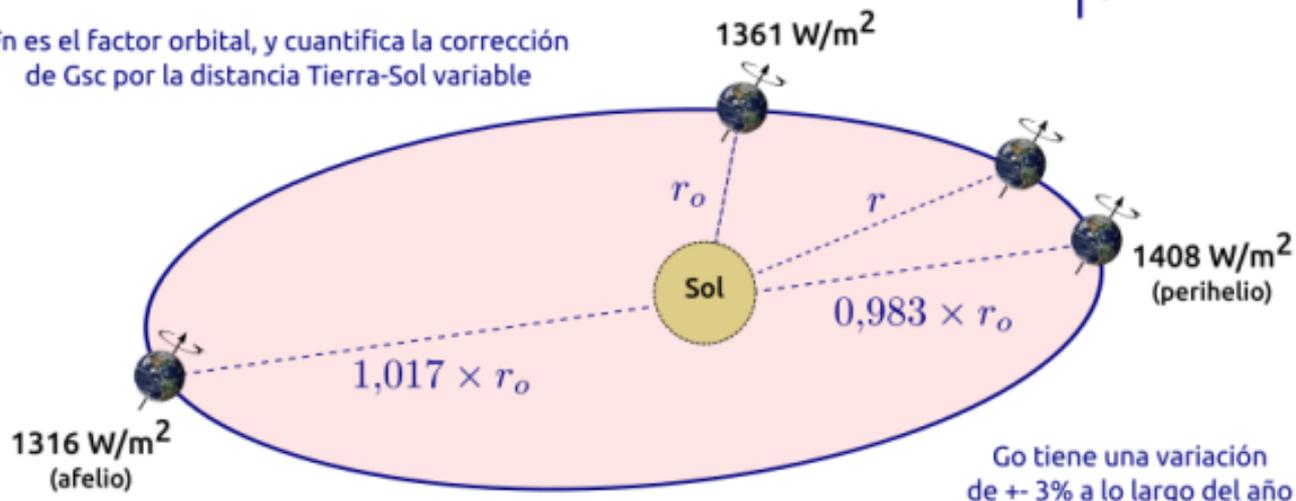
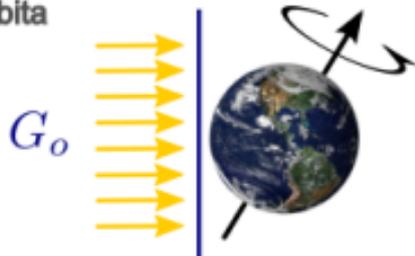
$r$  es en una posición arbitraria de la órbita

De lo que se obtiene:

$$G_o = \left(\frac{r_o}{r}\right)^2 G_s = F_n G_s$$

$F_n$  es el factor orbital, y cuantifica la corrección de  $G_s$  por la distancia Tierra-Sol variable

Plano normal a la línea Tierra-Sol



A lo largo del año, la irradiancia TOA varía en  $\pm 3.3\%$  por el factor orbital.

A partir de las propiedades de la órbita elíptica terrestre de excentricidad  $\epsilon = 0.01671123^*$

En las notas del curso se demuestra:

$$F_n = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = \frac{(1 + \epsilon \cos \varphi)^2}{1 - \epsilon^2} \approx 1 + 2\epsilon \cos \varphi = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad \text{3\% de variación}$$

La fase de la Tierra en su órbita se parametriza en forma diaria:  $\varphi = \frac{2\pi n}{365}$

donde n es el ordinal-día: n=1,2,3 .... 365

expresión exacta, dentro de la aproximación elíptica.

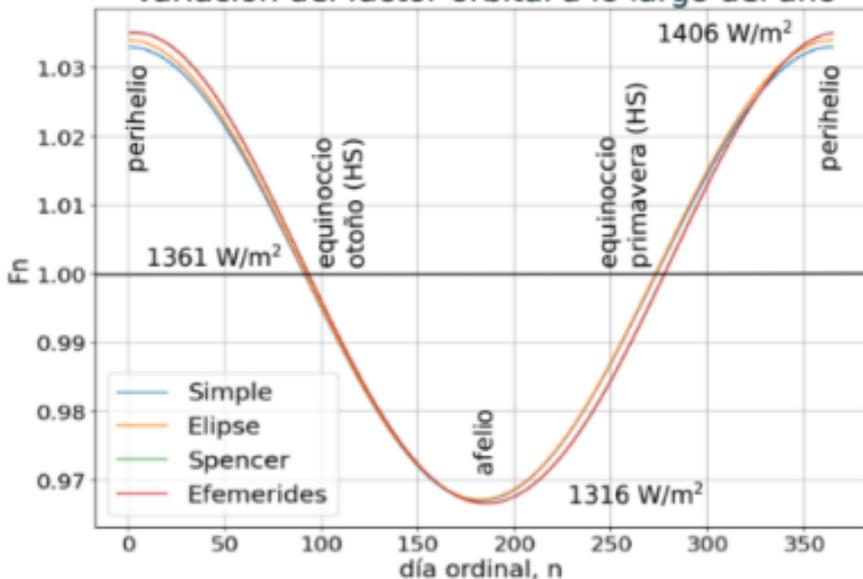
Parametrización de **Spencer** (precisa a  $10^{-4}$ )

fase orbital modificada:  $\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365}$

$$F_n = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) \\ + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma)$$

esta es la expresión a usar en cálculos automatizados.

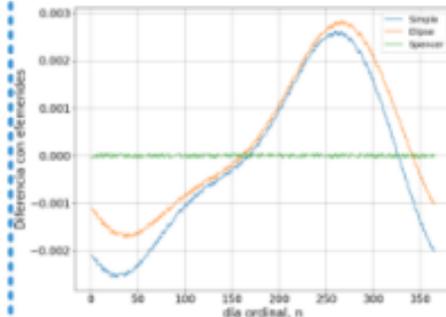
## Variación del factor orbital a lo largo del año



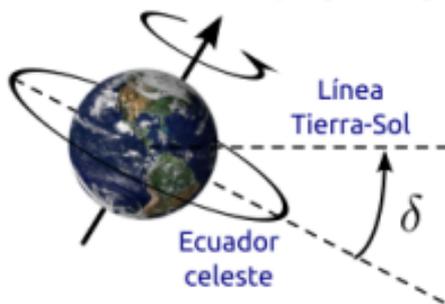
$n$  está tabulado para cada mes y día del año en las Notas de Recurso Solar (NRS).

$F_n$  describe una variación de  $\pm 45 \text{ W/m}^2$  en el valor de la irradiancia TOA

**diferencias con valores tabulados (efemérides):**  
 aprox. elíptica:  $10^{-3}$   
 Spencer:  $10^{-4}$



## DECLINACIÓN SOLAR $\delta$



La declinación solar varía entre  $\pm 23,5^\circ$  a lo largo de la trayectoria terrestre



Equinoccio  
20/21 de marzo

$\delta = 0$

$\delta = +23,5^\circ$

Solsticio

21/22 de junio

Plano de la eclíptica

Sol

Solsticio  
21/22 de diciembre  
 $\delta = -23,5^\circ$

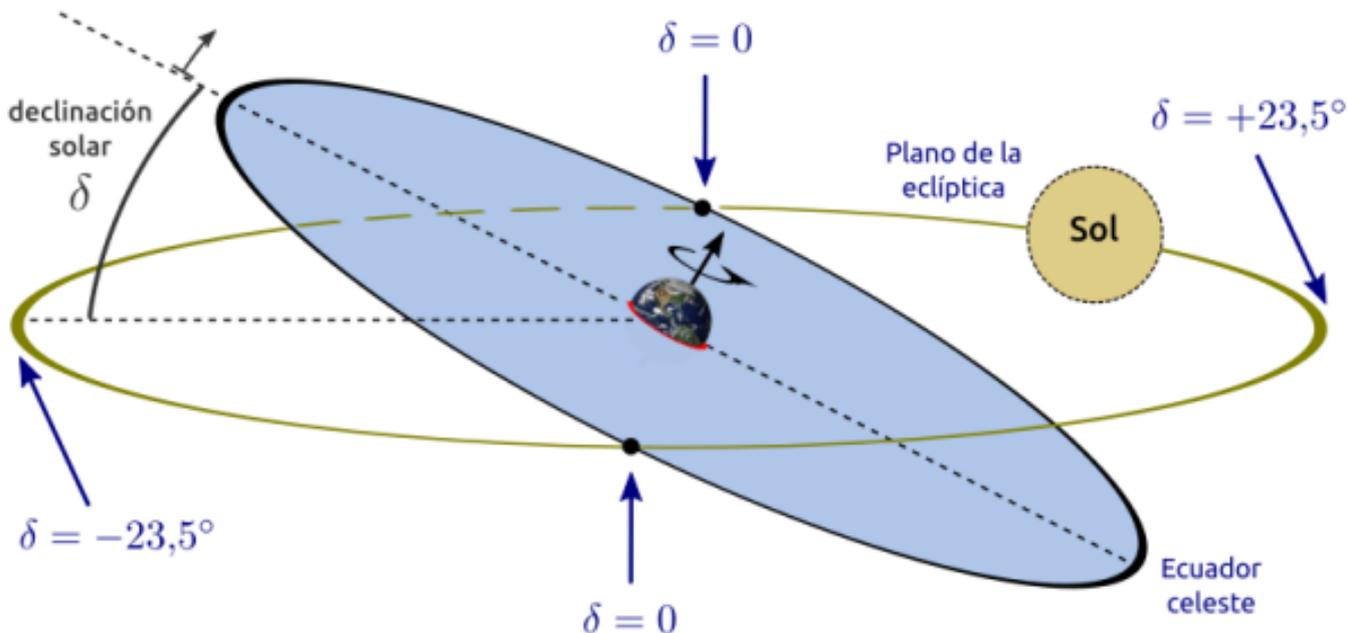
$\delta = 0$

Equinoccio

22/23 de setiembre

## Tenemos que saber ubicar al Sol...

En un sistema solidario a la Tierra, a lo largo del año el Sol describe un movimiento aparente sobre la eclíptica. Este diagrama permite observar de forma sencilla como varía la declinación solar según la posición Tierra-Sol.



Se parametriza en términos del día juliano ( $n$ )

### Parametrización de Cooper (simple)

$$\delta = \delta_0 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad \delta_0 = 23.45^\circ = 0.409 \text{ rad}$$

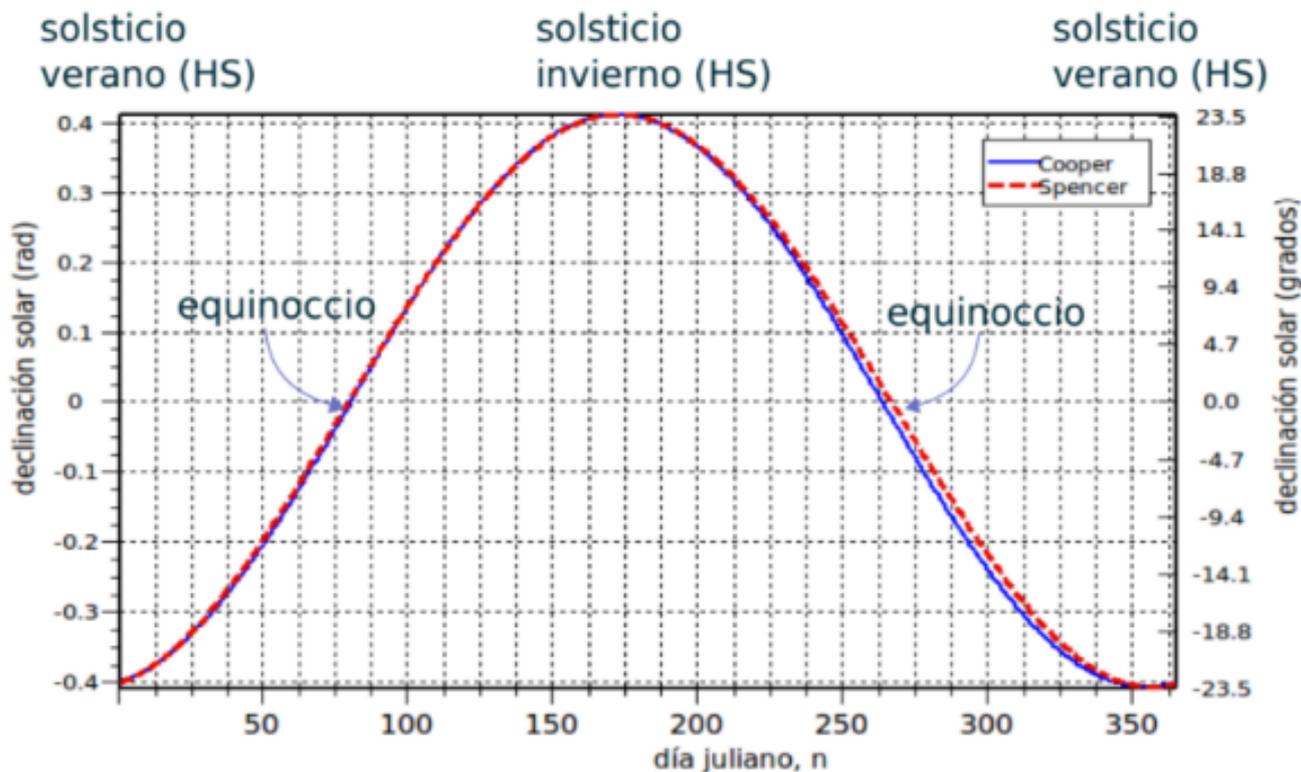
### Parametrización de Spencer (más precisa, recomendada)

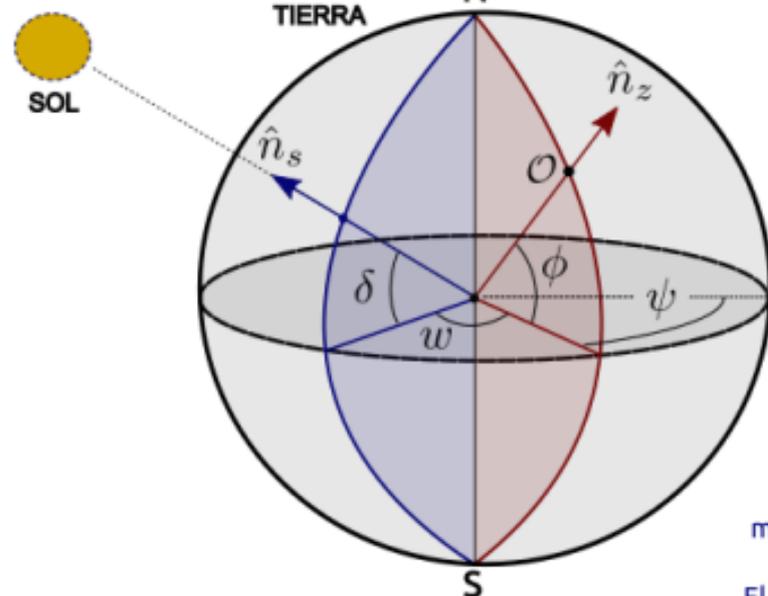
$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma) + 0.070257 \sin(\Gamma) - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma)$$

fase orbital

$$\Gamma = \frac{2\pi(n - 1)}{365}$$

(error max: 3' de arco)





### Ubicación de un observador (O)

Latitud (desde el ecuador) :  $\phi$

Longitud (desde Greenwich):  $\psi$

### Ubicación del Sol

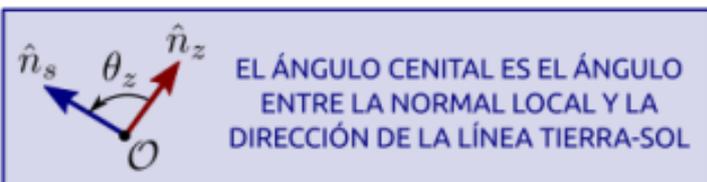
Declinación solar:  $\delta$

Ángulo horario:  $w$

El ángulo horario es el ángulo entre el meridiano del observador y el meridiano solar

El ángulo horario crece a una tasa de 15 grados por hora (rotación de la Tierra)

Por convención es negativo en la mañana y positivo en la tarde (es cero al mediodía solar)

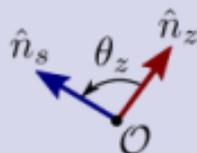


Calculando el producto escalar entre el versor normal local y el versor solar se obtiene que ....

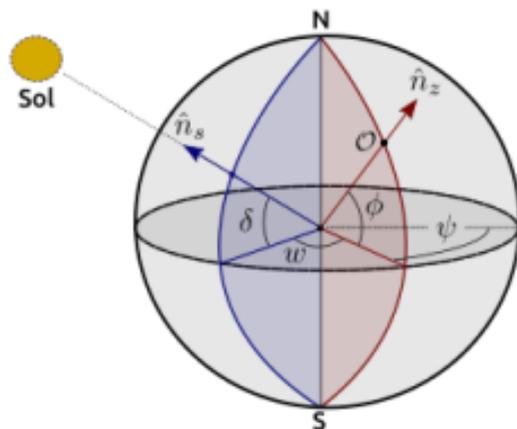
$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos w$$

Coseno del ángulo entre el cenit local y la dirección del Sol

Es un ángulo básico para todos los cálculos relacionados al recurso solar



EL ÁNGULO CENITAL ES EL ÁNGULO ENTRE LA NORMAL LOCAL Y LA DIRECCIÓN DE LA LÍNEA TIERRA-SOL



En el mediodía solar  $\omega=0$ .

Por convención:

$\omega < 0$  en la mañana (AM). Sol al Este del observador

$\omega > 0$  en la tarde (PM). Sol al Oeste del observador

**propiedad:** Para cierto día (n), el ángulo cenital es mínimo (altura solar máxima) durante el mediodía solar

ángulo cenital mínimo

propiedad trigonométrica

$$\cos \theta_{zm} = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi = \cos(\delta - \phi)$$

es decir:

$$\theta_{zm} = |\delta - \phi|$$

**corolarios interesantes:**

- en equinoccios  $\theta_{zm}$  coincide con latitud
- el Sol alcanza el cenit solo en latitudes entre los trópicos
- la altura solar máxima en zonas subtropicales se da en el solscitio de verano
- en algunos días puede ser mayor a  $90^\circ$  en zonas polares (debajo del horizonte)

Sucede cuando  $\cos \theta_z = 0$  suponiendo horizonte plano y despejado de obstáculos

es decir:  $\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi$

Dos soluciones: al amanecer y atardecer

$$\omega_s = \pm \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$$

permite calcular la duración del día...

## DURACIÓN DIURNA

$$\left( \arccos(0) = \frac{\pi}{2} \right)$$

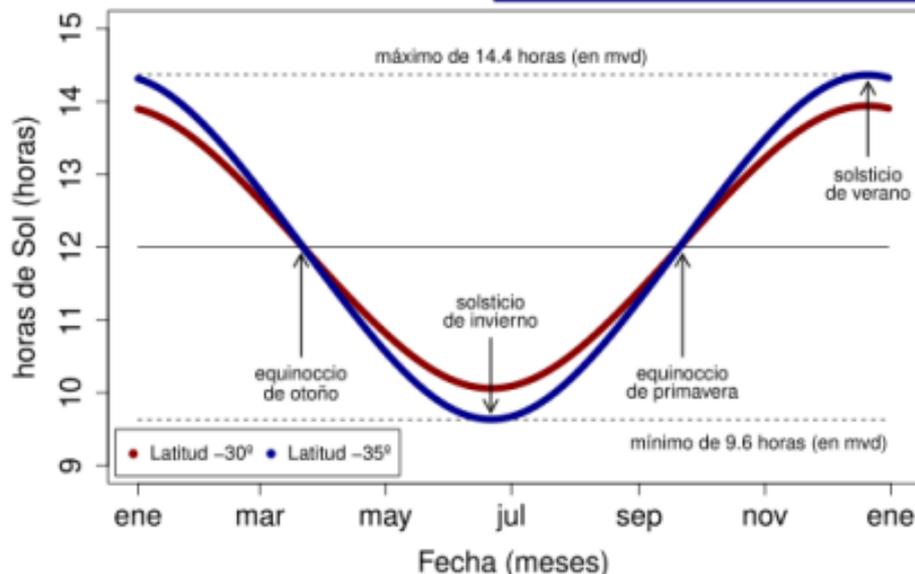
sobre el ecuador ( $\phi = 0$ )  
 $N_o = 12$  horas

ÁNGULO HORARIO

RECORRIDO:  $2 \times w_s$

NÚMERO DE HORAS DE SOL (máximo, horas y fracción)

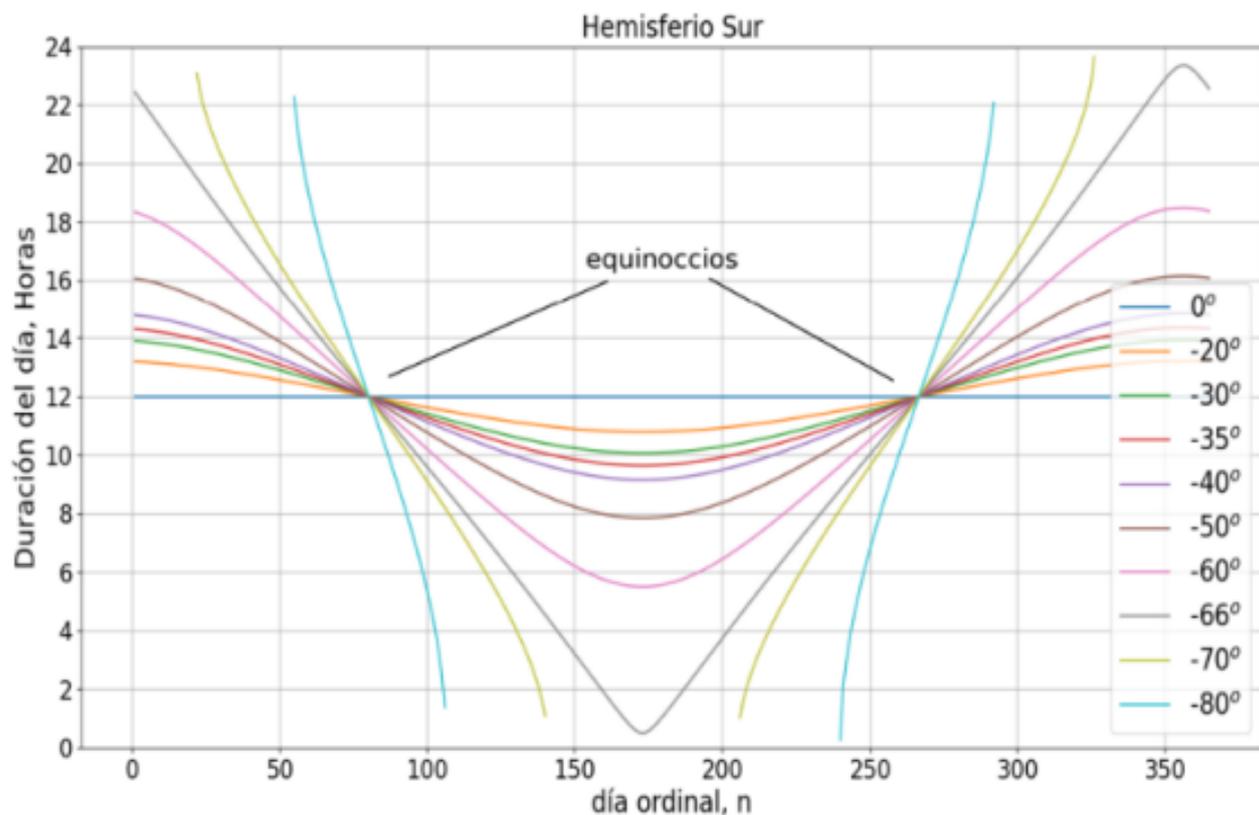
$$N_o = \left( \frac{12}{\pi} \right) \times 2w_s = \left( \frac{24}{\pi} \right) \times \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$



en los equinoccios ( $\delta = 0$ )  
 $N_o = 12$  horas

OJO CON LAS UNIDADES!  
 (ángulos en radianes)

A medida que las latitudes se acercan al ecuador, existe menos variación del régimen anual respecto a las 12 horas



## TIEMPO SOLAR (hora solar) $t_s$

La rotación de la Tierra define una hora solar para cada uno de sus puntos, que depende de la posición relativa entre el meridiano local y el meridiano solar

Relación entre el ángulo horario y la hora solar:

$$w = \frac{\pi}{12} (t_s - 12)$$

Donde el tiempo solar debe estar expresado en horas y fracción

Mediodía solar en un sitio:

Instante en que el meridiano local coincide con el meridiano solar.

El mediodía solar ocurre cuando son las 12:00:00 (en hora solar!  $t_s = 12.0$  horas)

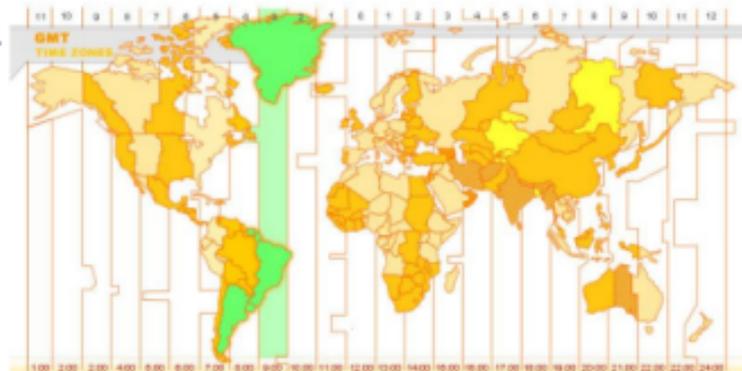
## TIEMPO ESTÁNDAR (hora local) $t_u$

Usos horarios →

24 usos horarios de 15° cada uno  
(15° x 24 = 360°, todo el globo)

La hora local se refiere a un uso horario  
(Uruguay está en el GMT-3 ubicado en -45°)

La hora local se puede expresar respecto a otro uso horario GMT restando/sumando las horas que correspondan



## HORA SOLAR VS HORA LOCAL

Se debe corregir la hora local por la longitud del sitio específico.

No todos los días duran 24 horas!

Por conservación del momento angular la Tierra no siempre rota a la misma velocidad angular. Esto ocurre por la órbita elíptica y oblicua de la Tierra (mayor velocidad en el perihelio que en el afelio)

La **ECUACIÓN DEL TIEMPO (E)** cuantifica estas diferencias, entre ~+16 minutos y ~-14 minutos.

HORA SOLAR →  $t_s = t_u + \frac{\psi - \psi_u}{15} + \frac{E}{60}$  ← ECUACIÓN DEL TIEMPO (en minutos)

Ambas deben estar expresadas en horas y fracción

HORA LOCAL

**CORRECCIÓN POR LONGITUD**

La longitud  $\psi_u$  es la posición del GMT en el que está expresada la hora local  $t_u$

Ambas longitudes deben ser consideradas con su signo (negativos para Uruguay)

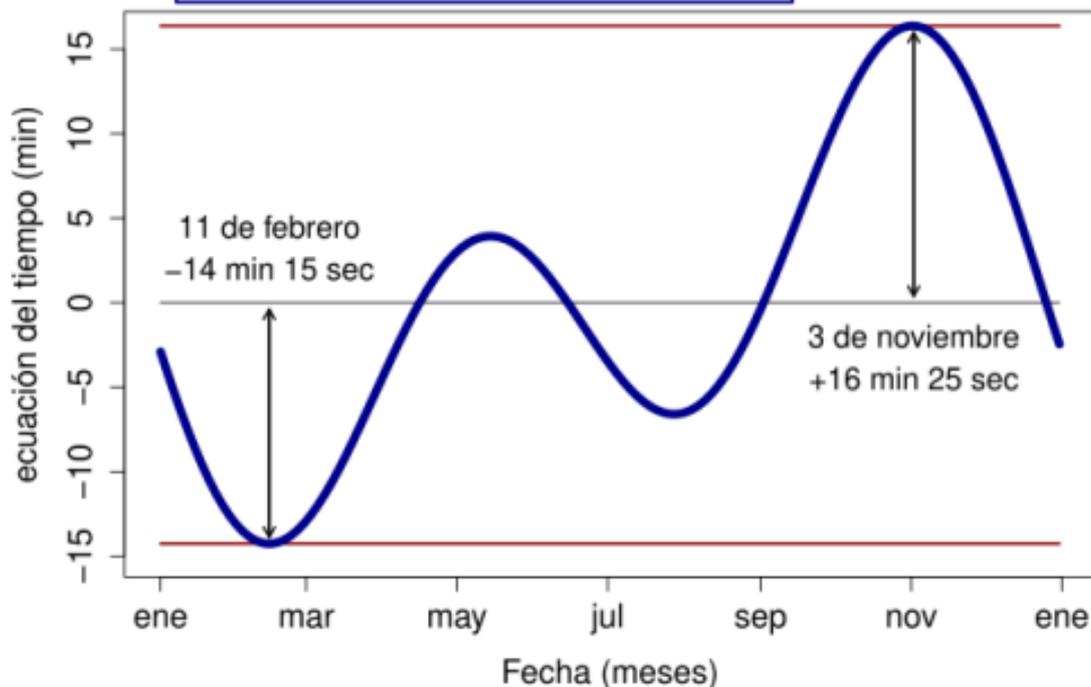
$$E = 229,18 \text{ min} \times [0,000075 - 0,032077 \text{ sen } \Gamma - 0,040890 \text{ sen } 2\Gamma + 0,001868 \text{ cos } \Gamma - 0,014615 \text{ cos } 2\Gamma]$$

Donde:  $\Gamma = 2\pi \times \left(\frac{n-1}{365}\right)$

## ECUACIÓN DEL TIEMPO

$$E = 229,18 \text{ min} \times [0,000075 - 0,032077 \text{ sen } \Gamma - 0,040890 \text{ sen } 2\Gamma + 0,001868 \text{ cos } \Gamma - 0,014615 \text{ cos } 2\Gamma]$$

Es una corrección de  
~ ±15 minutos  
y variable a lo largo del año



La descripción local del movimiento aparente del Sol se basa en la altura solar  $\alpha_s$  y en el **ángulo azimutal**  $\gamma_s$  que describe la orientación de la línea Tierra-Sol sobre el plano horizontal del observador.

**Convención de signos:** (usada en este curso)

$\gamma_s = 0$ : proy. al ecuador (Norte en HS)

$\gamma_s < 0$ : Sol al Este del observador (mañana)

$\gamma_s > 0$ : Sol al Oeste del observador (tarde)

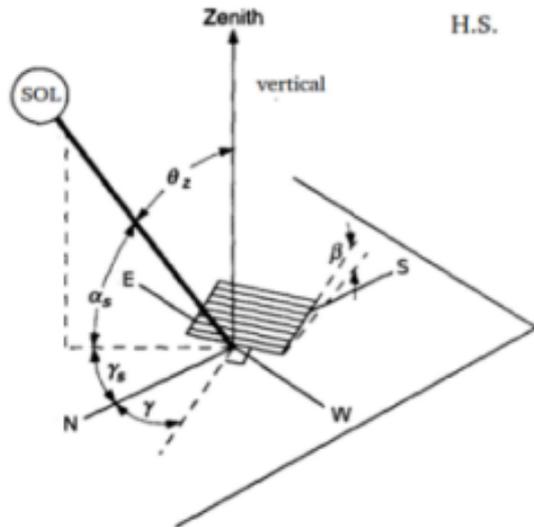
**Cuidado:** la mayoría del software y libros usa la convención para el H.N. y pueden cambiar signos en expresiones que involucran al azimut.

**orientación de una superficie captadora:**

queda determinada por dos ángulos definidos sobre los planos horizontal y vertical:

$\gamma$ : ángulo azimutal de la superficie ( $-180^\circ$ ,  $180^\circ$ )

$\beta$ : ángulo de inclinación ( $0$ ,  $90^\circ$ )



A diferencia de  $\omega$ , el ángulo azimutal no varía a tasa cuasi constante.

En las NRS se obtienen las expresiones para el ángulo azimutal solar

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos \omega}{\cos \alpha_s}$$

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s},$$

**convención de signos** idéntica a  $\omega$ :

$\gamma_s = 0$  a mediodía solar

$\gamma_s < 0$  en la mañana (Sol al Este del obs)

$\gamma_s > 0$  en la tarde (Sol al Oeste del obs)

**Precaución 1:** diverge cuando  $\alpha_s = 90^\circ$  (el azimut esta indefinido).

Esto solo sucede a mediodía solar ( $\omega = 0$ ) a latitudes entre los trópicos.

**Precaución 2:** el uso de las funciones trigonométricas inversas puede dar resultados en el cuadrante inadecuado, generando problemas de continuidad.

La expresión en términos del ángulo cenital es más recomendable para trabajar

$$\gamma_s = \text{signo}(\omega) \left| \arccos \left( \frac{\sin \delta - \cos \theta_z \sin \phi}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|.$$

Cuidado:

esta expresión diverge

si  $\theta=0$  o en los polos

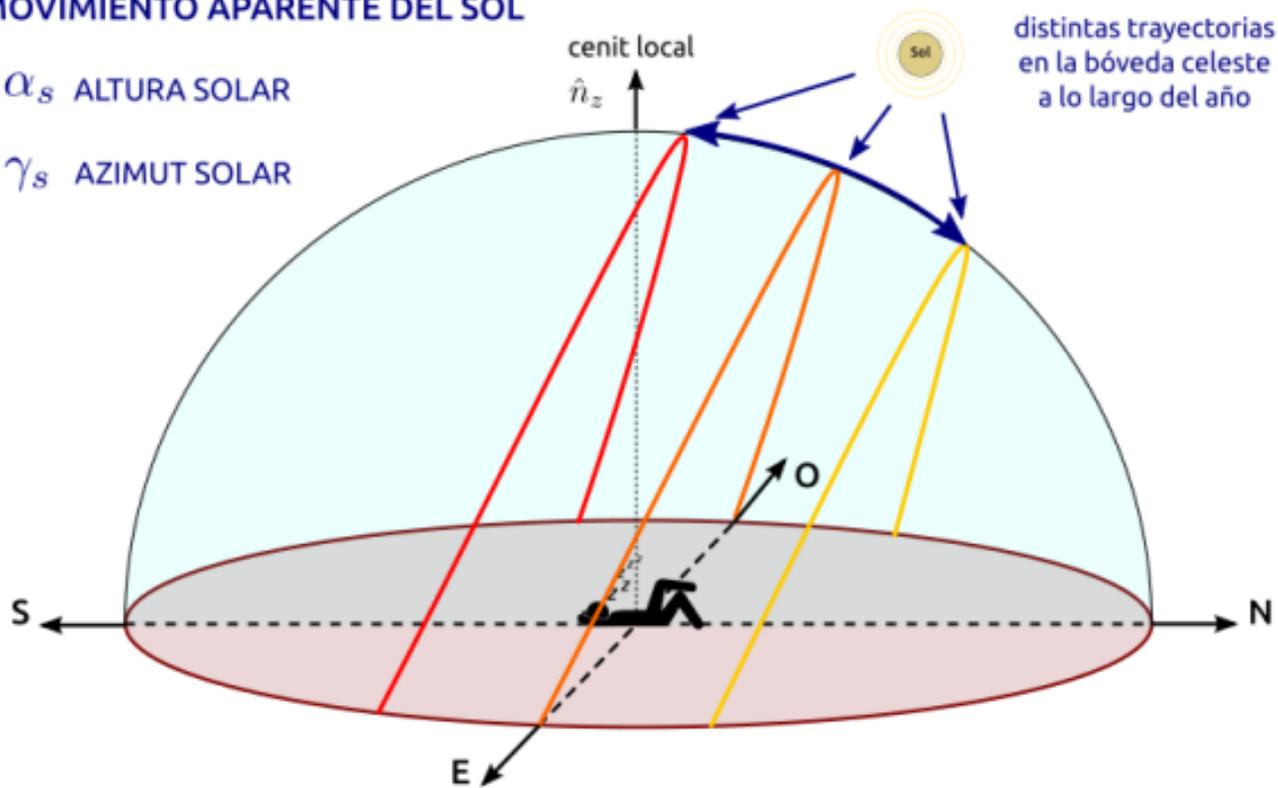
Los valores extremos de  $\gamma$  a la salida y puesta del Sol pueden obtenerse como caso particular usando  $\cos \theta_z = 0$

$$\gamma_s = \pm \left| \arccos \left( \frac{\sin \delta}{\cos \phi} \right) \right|$$

## MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL

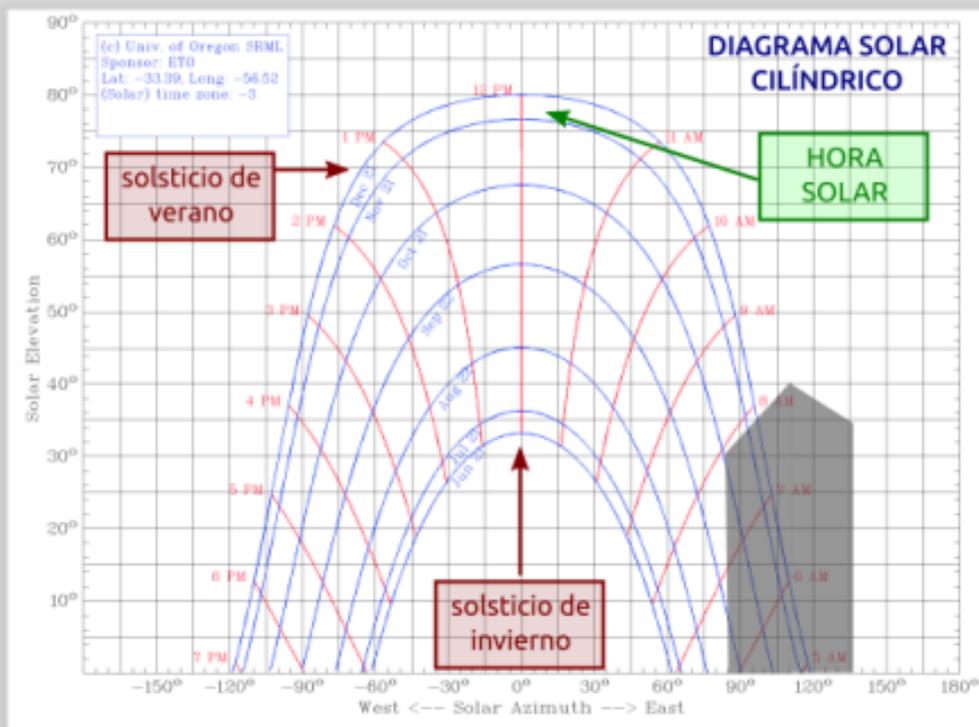
$\alpha_S$  ALTURA SOLAR

$\gamma_S$  AZIMUT SOLAR



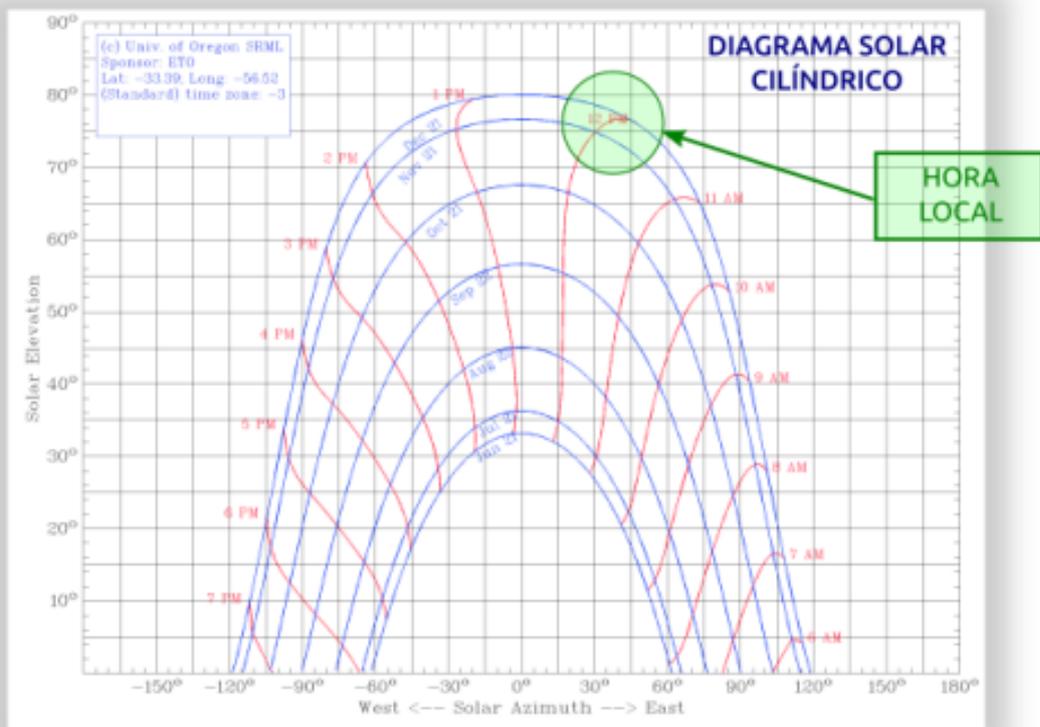
## DIAGRAMA SOLAR

Las diferentes trayectorias aparentes del Sol a lo largo del año se pueden resumir en un diagrama solar (cilíndrico o estereográfico)



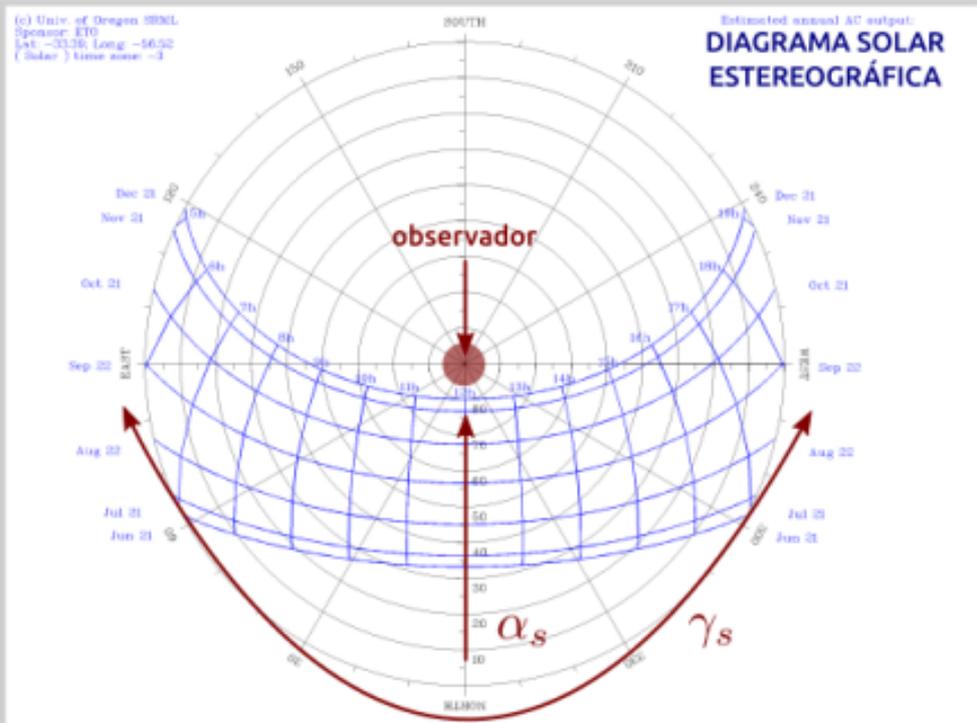
## DIAGRAMA SOLAR

Las diferentes trayectorias aparentes del Sol a lo largo del año se pueden resumir en un diagrama solar (cilíndrico o estereográfico)

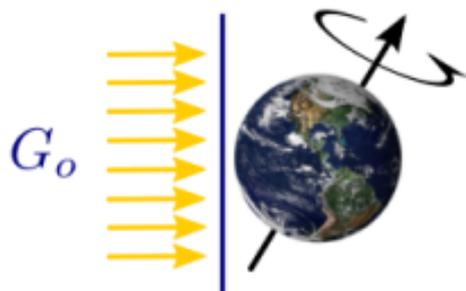


## DIAGRAMA SOLAR

Las diferentes trayectorias aparentes del Sol a lo largo del año se pueden resumir en un diagrama solar (cilíndrico o estereográfico)



## IRRADIANCIA EN INCIDENCIA NORMAL



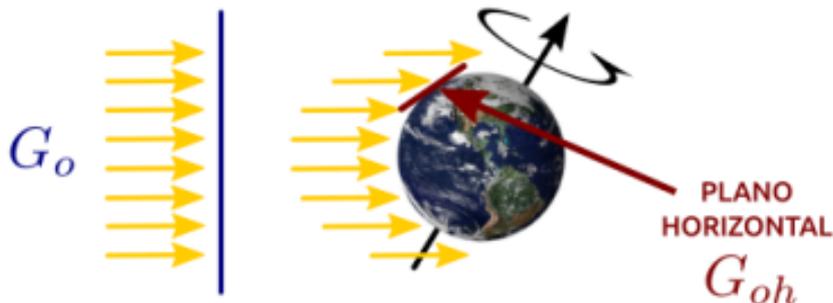
IRRADIANCIA EN INCIDENCIA NORMAL EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA:

$$G_o = G_{sc} F_n$$

IRRADIANCIA EN PLANO HORIZONTAL EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA:

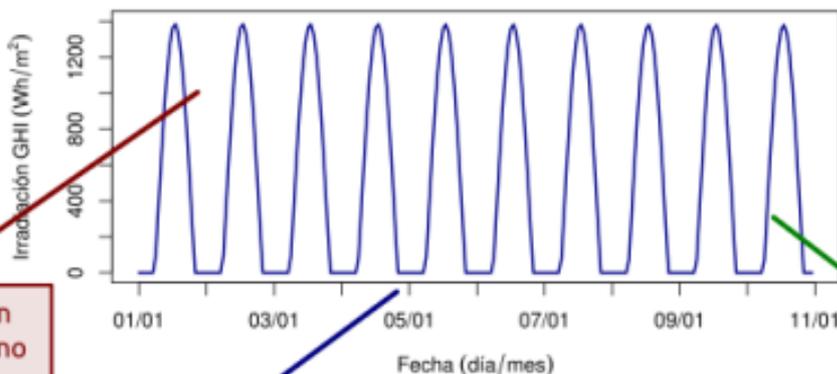
$$G_{oh} = G_o \cos \theta_z = G_{sc} F_n \cos \theta_z$$

## IRRADIANCIA EN PLANO HORIZONTAL



Se proyecta la irradiancia en incidencia normal sobre el plano horizontal

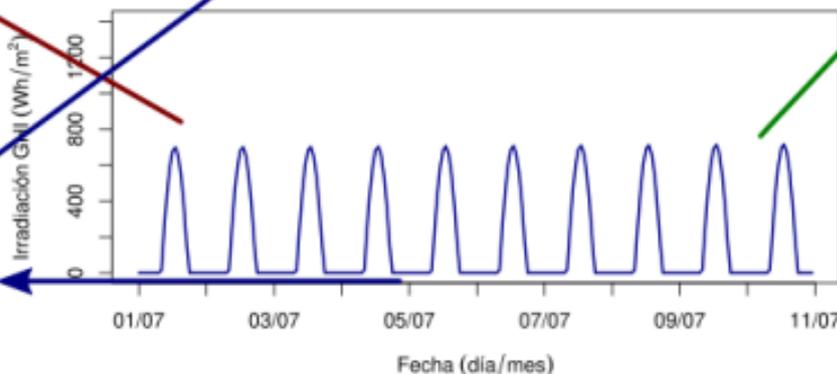
Irradiación solar en el tope de la atmósfera – Sur – Enero 2014



los máximos son mayores en verano que en invierno

comportamiento intra-día

Irradiación solar en el tope de la atmósfera – Sur – Julio 2014



máximo al mediodía solar

mayor duración del día en verano que en invierno

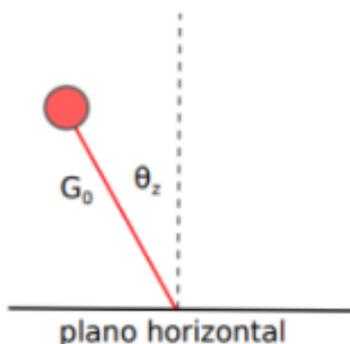
- **Irradiancia TOA** ( $\text{W/m}^2$ )  $G_s = 1361 \text{ W/m}^2$

en incidencia normal

$$G_0 = G_s F_n$$

sobre plano horizontal

$$G_{0h} = G_0 \cos \theta_z = G_s F_n \cos \theta_z$$



- **Irradiación** en intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$  ( $\text{kJ/m}^2$ )

en incidencia normal

$$I_0 = G_s F_n \Delta t = I_s F_n \quad I_s = G_s \Delta t \quad \text{TSI adecuada al período que nos interesa}$$

$$1 \text{ Kwh} = 3.6 \text{ MJ}$$

**Ejemplo:** versión horaria de la constante solar

$$\rightarrow I_s \equiv 3600 \text{ s} \times G_s = 1.361 \text{ kWh/m}^2 \stackrel{\downarrow}{=} 4.90 \text{ MJ/m}^2$$

sobre plano horizontal

$$I_{0h}(\omega_1, \omega_2) = \int_{t_1}^{t_2} G_{0h} dt = G_{cs} F_n \frac{12 \text{ h}}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_z d\omega$$

$$= \frac{12}{\pi} I_s F_n [(\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \cos \delta \cos \phi + (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin \phi]$$

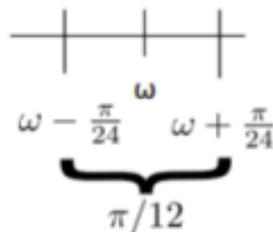
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12} \text{ rad/h}$$

$$\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

## Integrando irradiancia en la hora centrada en $\omega$

$$I_{0h}(\omega) = I_s F_n \frac{12}{\pi} \int_{\omega - \pi/24}^{\omega + \pi/24} \cos \theta_z d\omega$$

promedio de  $\cos \theta_z$   
en la hora...



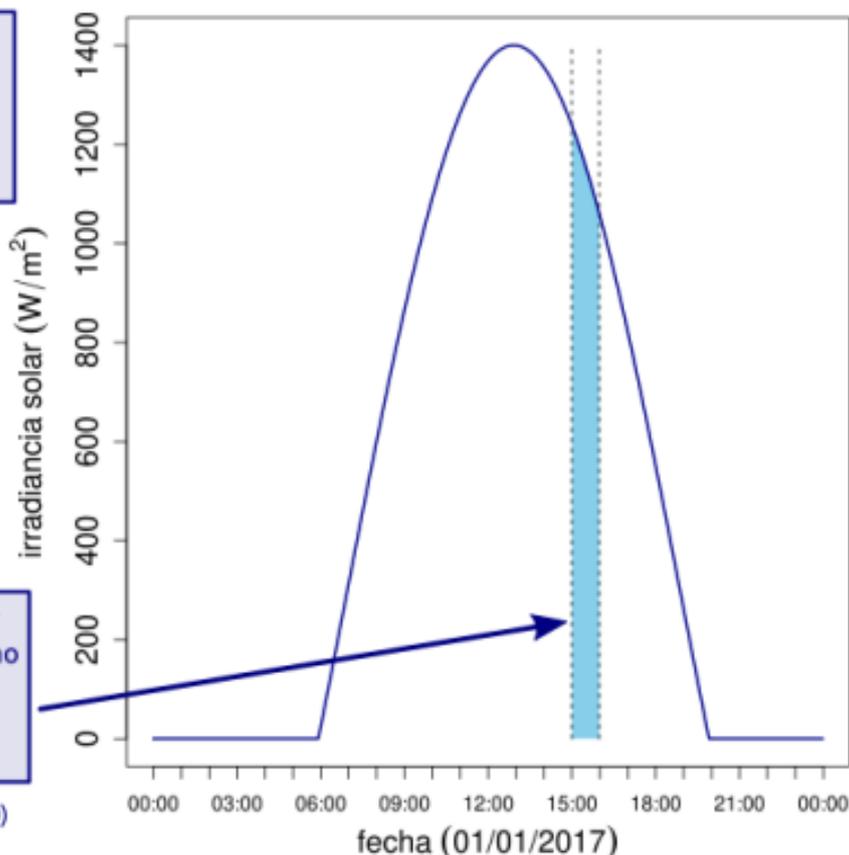
$$= \frac{12}{\pi} I_s F_n \left[ (\sin(\omega + \pi/24) - \sin(\omega - \pi/24)) \cos \delta \cos \phi + \frac{\pi}{12} \sin \delta \sin \phi \right]$$

$$\approx I_s F_n (\cos \omega \cos \delta \cos \phi + \sin \delta \sin \phi) = I_s F_n \cos \theta_z$$

↑  
aproximación:  $\sin(\pi/24) \approx \pi/24$   
(diferencia <0.3%)

La irradianción horizontal horaria TOA se puede calcular como el producto de la TSI horaria y el coseno del ángulo cenital (instantáneo) en el centro de la hora

irradiancia solar  
en un plano  
horizontal en el  
tope de la  
atmósfera



irradiación solar  
horaria en un plano  
horizontal en el  
tope de la  
atmósfera

(ej. de 15:00 a 16:00)

Integrando irradiancia TOA sobre PH en **todo el día**:

ángulo horario del ocaso

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

$$\begin{aligned}
 H_{0h} &= \int_{-t_s}^{t_s} G_{0h} dt = G_s F_n \frac{12 \text{ h}}{\pi} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \cos \theta_z d\omega \\
 &= \frac{24}{\pi} I_s F_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)
 \end{aligned}$$

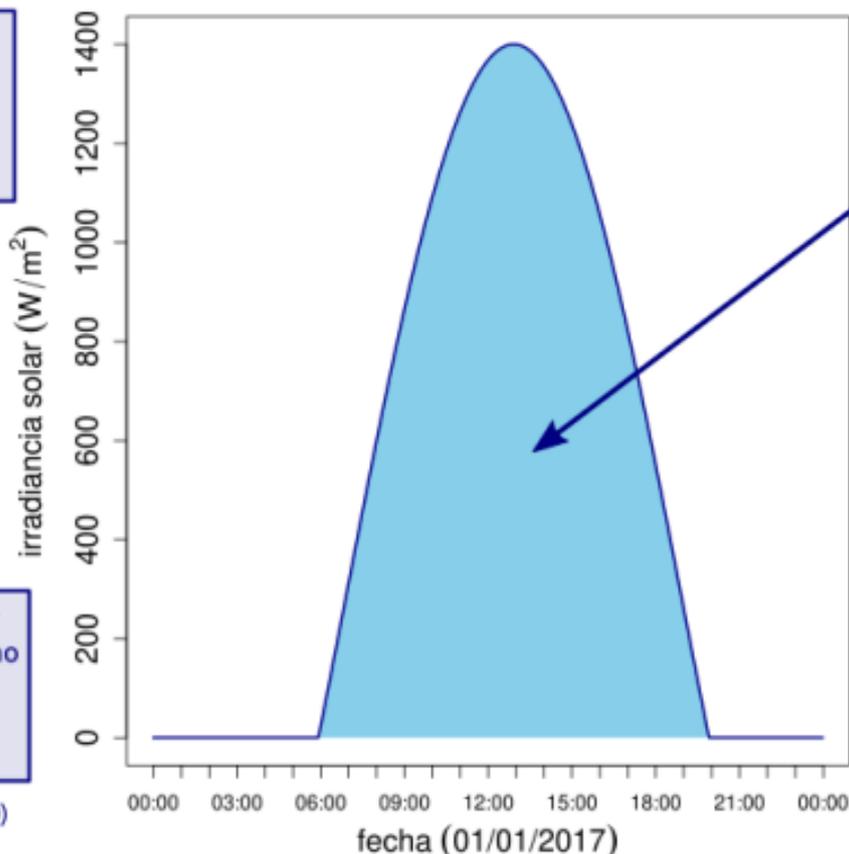
Ojo: debe estar en radianes!

Esta cantidad se usa para normalizar la irradiación diaria en plano horizontal.

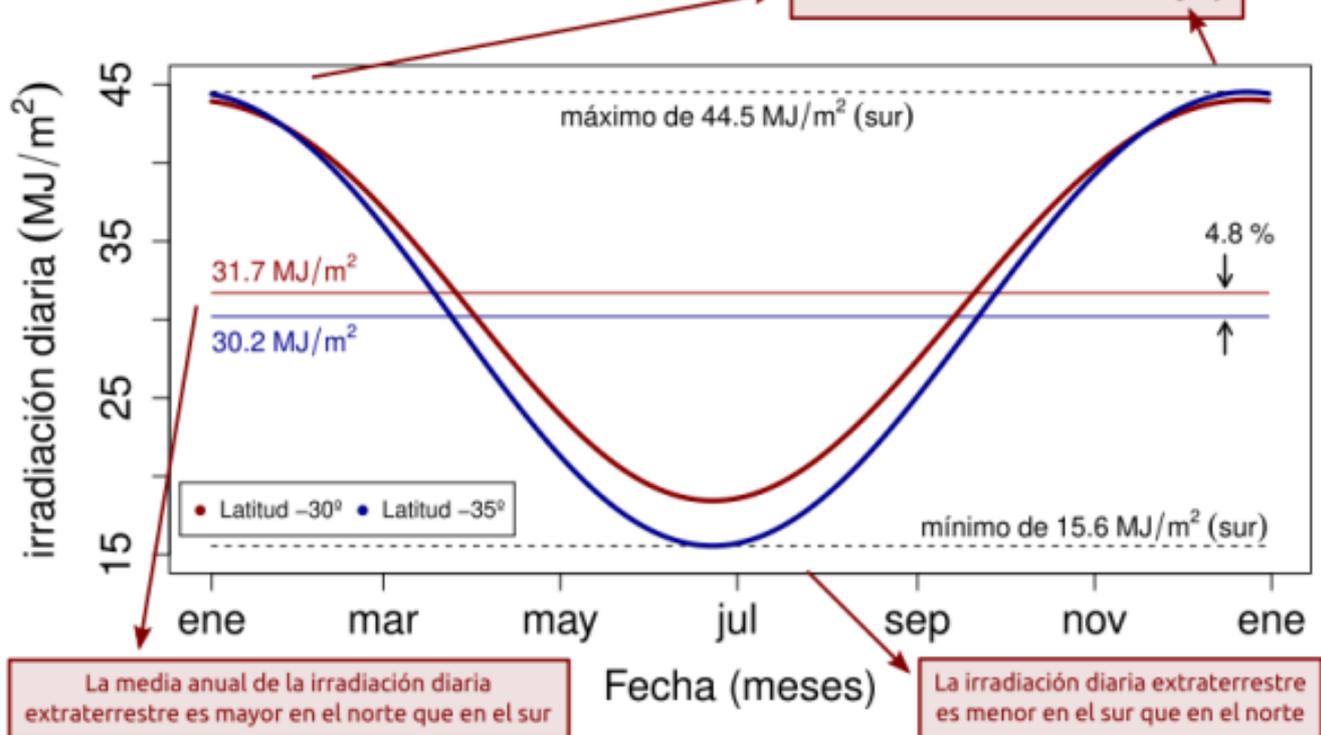
Orden de magnitud:  $\sim 37 \text{ MJ/m}^2$  o  $10 \text{ kWh/m}^2$

del orden de la mitad llega a la superficie por efecto de la atmósfera.

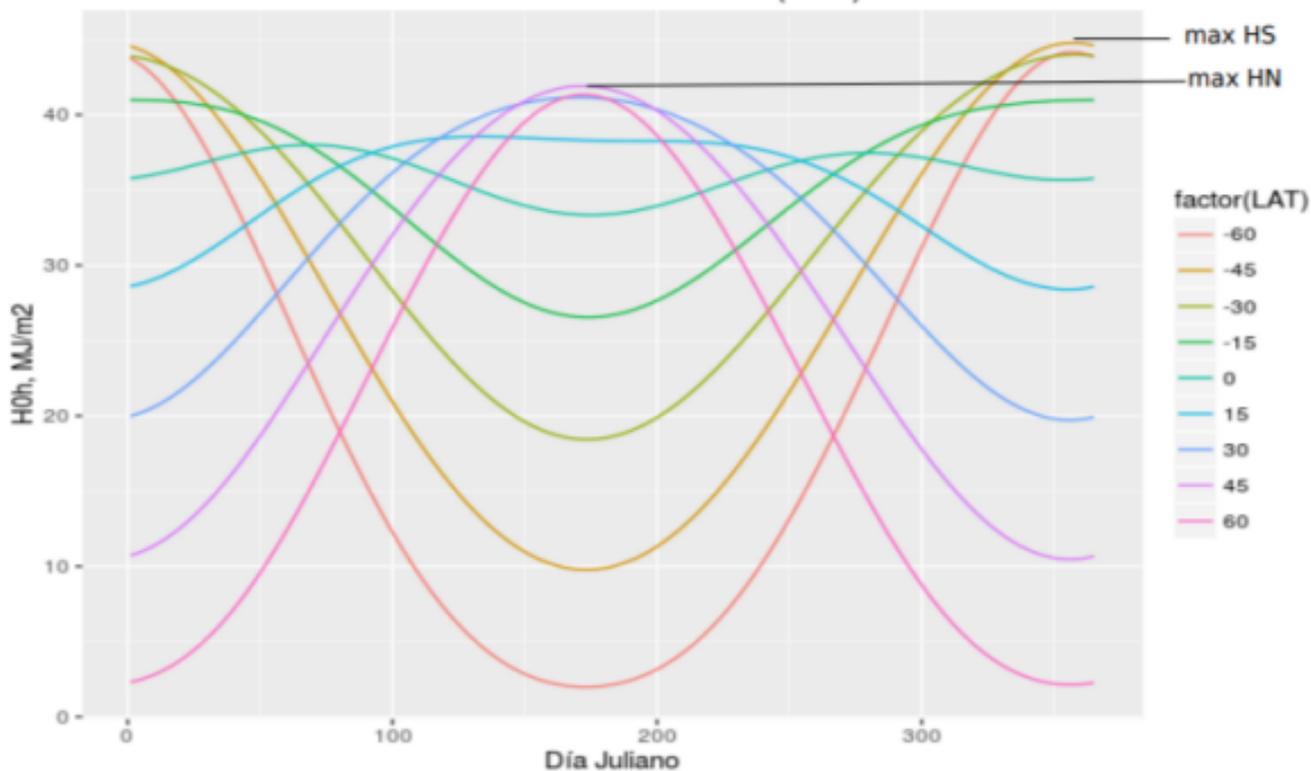
irradiancia solar  
en un plano  
horizontal en el  
tope de la  
atmósfera



## IRRADIACIÓN SOLAR DIARIA EN UN PLANO HORIZONTAL EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA

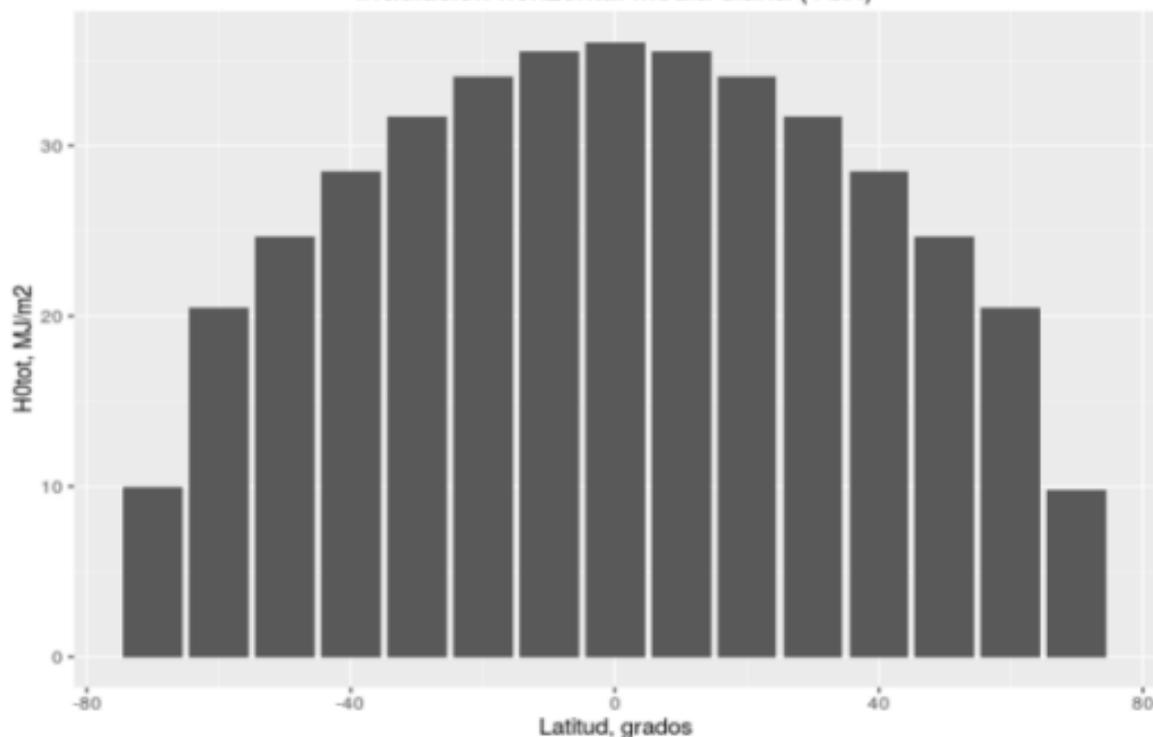


### Irradiación diaria horizontal (TOA)



## Total anual/365 días en función de la latitud

Irradiación horizontal media diaria (TOA)

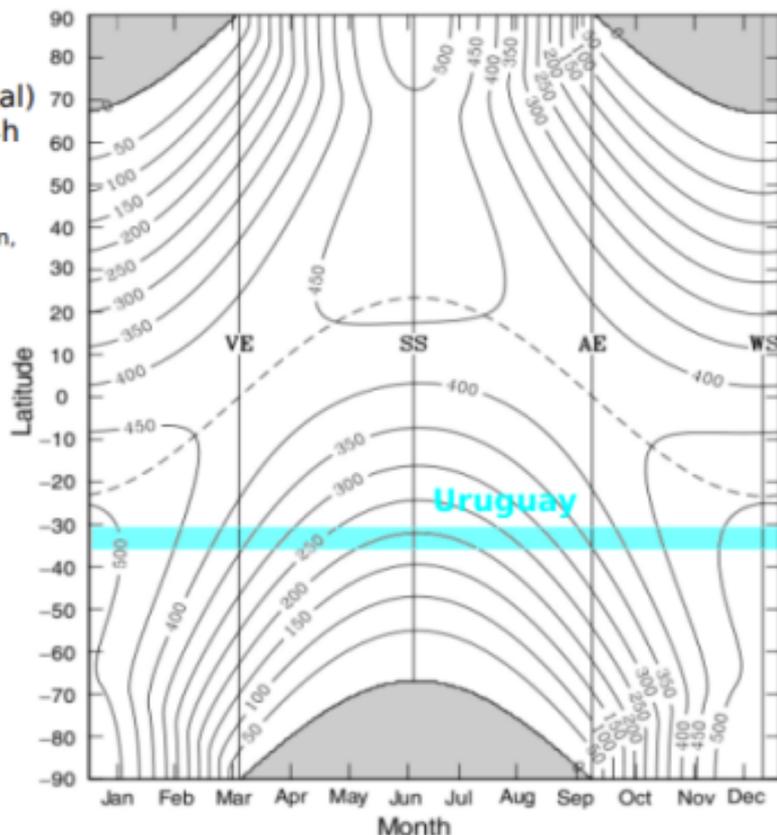


Isolneas de irradiación diaria extraterrestre (promedio mensual) sobre un plano horizontal,  $H_0/24h$  expresada en  $W/m^2$

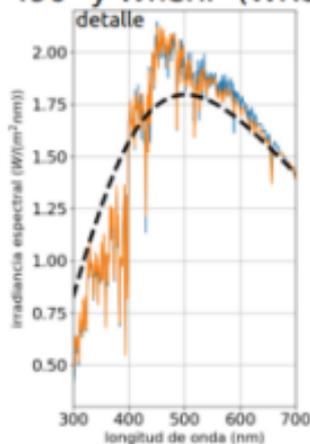
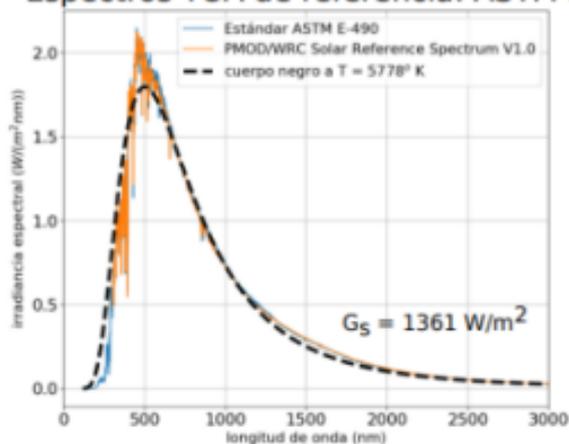
Liou, An introduction to atmospheric radiation, 2nd Ed. Academic Press 2002

### conversión a $MJ/m^2$

$W/m^2/24h$	$kWh/m^2$	$MJ/m^2$
0	0	0
50	1.2	4.32
100	2.4	8.64
150	3.6	12.96
200	4.8	17.28
250	6	21.6
300	7.2	25.92
350	8.4	30.24
400	9.6	34.56
450	10.8	38.88
500	12	43.2



## Espectros TOA de referencia: ASTM E-490<sup>1</sup> y Wherli<sup>2</sup> (WRC) (disponibles en NREL<sup>3</sup>)



el área bajo el espectro debe ser consistente con la constante solar usada:

$$\int_0^{\infty} G(\lambda) d\lambda \approx \sum_i G(\lambda) \Delta\lambda_i = G_{cs}$$

Banda espectral	Rango (nm)	Cuerpo negro T = 5778 K (%)	ASTM-E490 (%)
UV-C	0 - 280	2.1	0.5
UV-B	280 - 315	2.0	1.2
UV-A	315 - 400	8.0	6.0
VIS	400 - 700	36.7	38.8
N-IR	700 - 3000	49.1	51.5
M-IR	3000 - 25k	2.1	2.0
F-IR	25k - ∞	0.0	0.0

infrarrojo cercano

infrarrojo lejano o térmico

<sup>1</sup>American Society for Testing and Materials, ASTM E-490, 2000

PRÓXIMA CLASE ...  
RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Rodrigo Alonso-Suárez

r.alonso.suarez@gmail.com

<http://les.edu.uy/>



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA