

Radiación en la atmósfera

IV - Radiación solar en el tope de la atmósfera

Agustín Laguarda
laguarda@fing.edu.uy

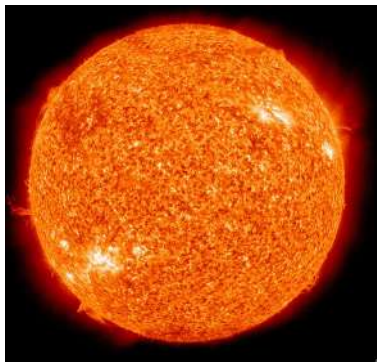
Universidad de la República

2023



- 1 El Sol y la constante solar
- 2 Movimiento aparente del Sol
- 3 Radiación en el tope de la atmósfera

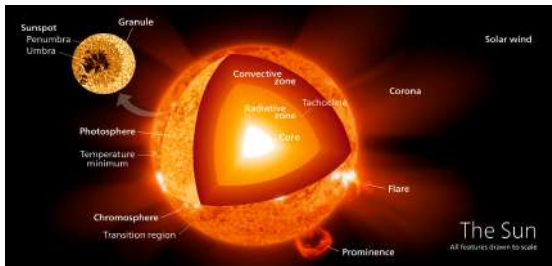
- 1 El Sol y la constante solar
- 2 Movimiento aparente del Sol
- 3 Radiación en el tope de la atmósfera



El Sol está compuesto principalmente de hidrógeno ($\simeq 74\%$ en masa) y helio ($\simeq 24\%$). Oxígeno, carbono, neón y hierro, conforman la fracción restante de su composición.

La energía del Sol se genera principalmente a través de la fusión nuclear. En el núcleo, los núcleos de hidrógeno (protones) colisionan y se fusionan para formar núcleos de helio. Este proceso libera una inmensa cantidad de energía en forma de rayos gamma, que luego se desplazan gradualmente desde el núcleo hacia el espacio como luz visible y otras formas de radiación electromagnética.

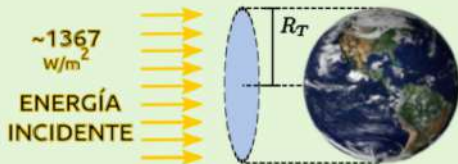
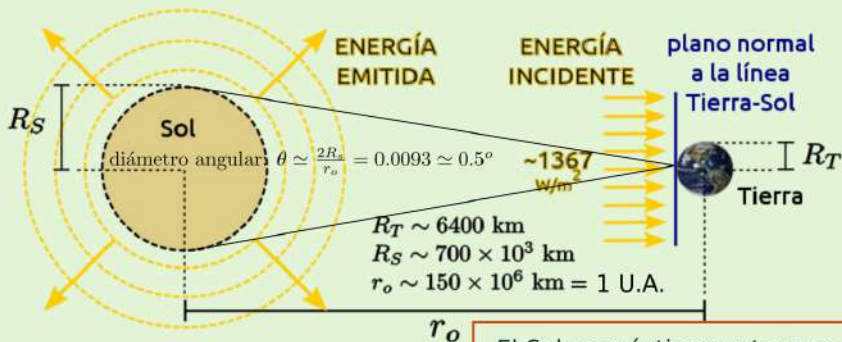
El Sol se encuentra actualmente en la fase de secuencia principal de su ciclo de vida, donde la fusión de hidrógeno domina. Ha estado brillando durante aproximadamente 4.6 mil millones de años y se espera que continúe en su estado actual durante varios mil millones de años más antes de agotar su combustible de hidrógeno y pasar a la fase de gigante roja.



- **Núcleo:** donde ocurre la fusión nuclear. Presión y temperatura hacen que los átomos de hidrógeno se combinen y formen helio, liberando energía
- **Zona radiactiva:** La energía se transporta (radiación) hacia las capas superiores
- **Zona convectiva:** La energía se transporta mediante el movimiento del plasma caliente, creando corrientes convectivas.
- **Fotósfera:** Superficie visible del Sol (donde la mayor parte de la radiación escapa al espacio)
- **Cromósfera:** Es una capa delgada de gas caliente e ionizado. Es visible durante los eclipses solares como un anillo rojo alrededor del disco oscurecido de la Luna.
- **Corona:** La corona es la capa más externa, extendiéndose millones de kilómetros en el espacio. Puede alcanzar el millón de grados K. No es visible.

El Sol exhibe **actividad magnética** en forma de manchas solares, erupciones solares y eyecciones de masa. Estos fenómenos están vinculados al campo magnético generado por el movimiento de partículas cargadas en su interior.

Constante Solar



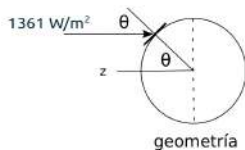
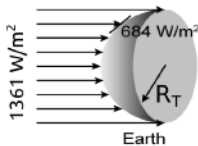
El Sol es prácticamente una fuente puntual para la Tierra:

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

valor convencional actual
de la constante solar
(previamente era 1367 W/m^2)

Irradiancia media TOA sobre la superficie diurna de la Tierra

$$\overline{G_s} = \frac{\int_A G_s \cos \theta dA}{\int_A dA}$$



En coordenadas cilíndricas $dA = R_T^2 \sin \theta d\varphi d\theta$. Integrando en toda la superficie diurna ("iluminada"),

$$\overline{G_s} = G_s \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\varphi d\theta} = \frac{G_s}{2} \simeq 681 \text{ W/m}^2$$

Obs: Si consideramos también la noche (la superficie terrestre completa), tenemos

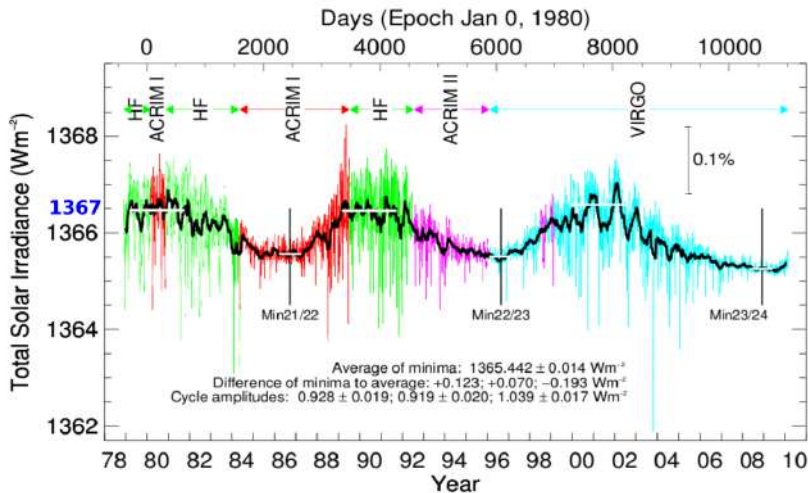
$$\overline{G_s} = \frac{G_s}{4} \simeq 340 \text{ W/m}^2$$

Potencia solar TOA

En cada instante, restamos recibiendo

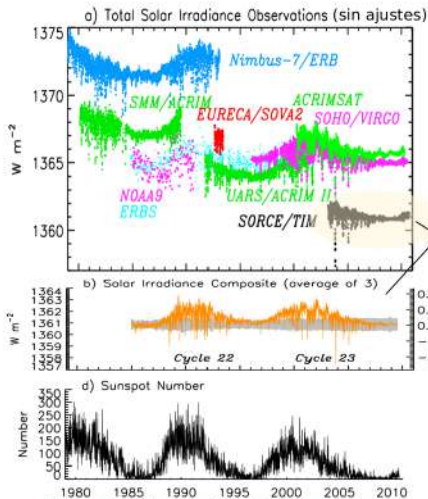
$$P = G_s \times \pi R_T^2 \simeq 175 \times 10^{15} \text{ W} = 175 \text{ pW}.$$

Medidas de TSI consistidas (antes de 2010)



Más info por ejemplo en <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87108-y>

Actividad solar y TSI

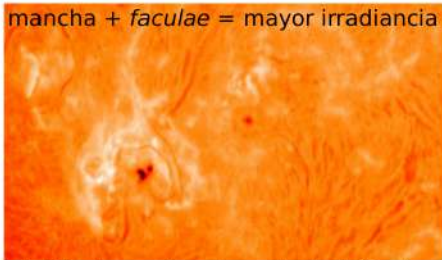


TSI = Total solar irradiance TOA
sustituye el nombre "constante solar"

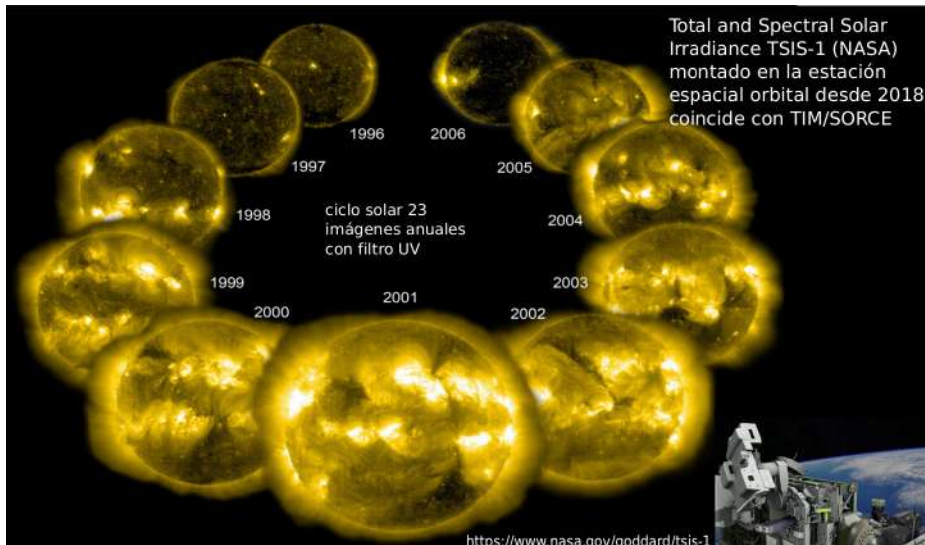
medidas de TSI previas a 2010 discrepan en hasta 15 W/m² por problemas de calibración de los espectroradiómetros montados en satélites.

SORCE/TIM: primer indicación de que TSI era menor a 1367 W/m² y cercano a 1361 W/m²

mancha + *faculae* = mayor irradiancia



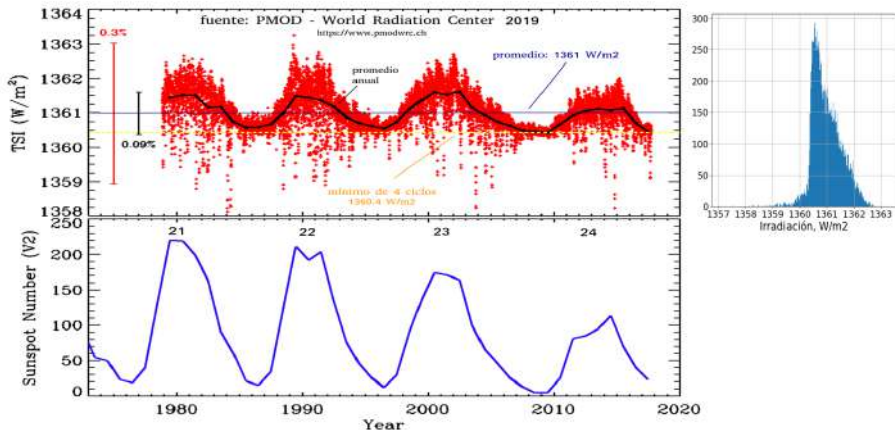
detalle de mancha solar, rodeada de faculae



Actividad solar y TSI

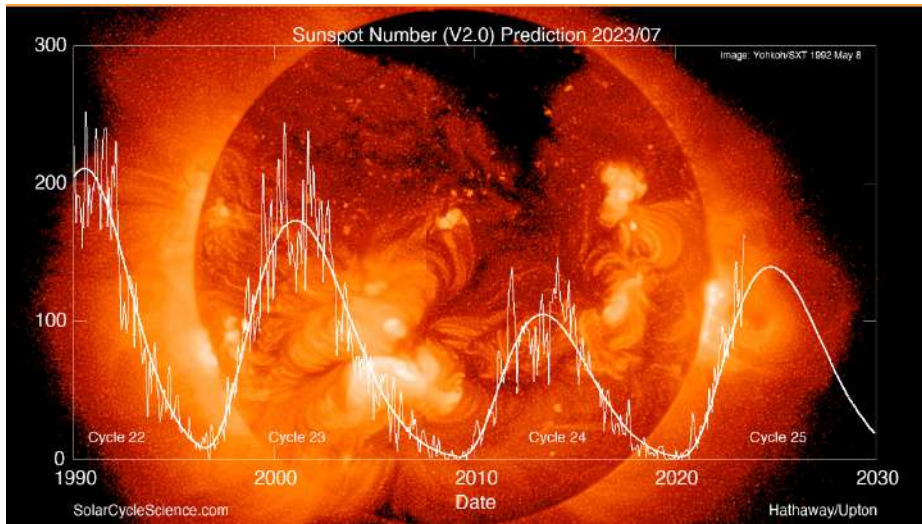
Datos recientes

Información moderna es consistente con $G_s = 1361 \pm 1 \text{ W/m}^2$



Actividad solar y TSI

Datos recientes



En febrero 2010, NASA lanza SDO (Solar Dynamics Observatory), una sonda para estudiar la actividad solar de cerca y llegar a comprender las causas del ciclo de 11 años...

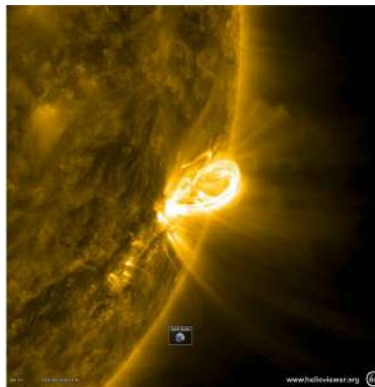


Figure:

<https://student.helioviewer.org/>

- SDO genera imágenes de alta resolución de la superficie del Sol y su actividad magnética (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>)
- Vale la pena ver https://www.youtube.com/watch?v=6tmbeLTHC_0
- Eventos destacables de la última década registrados por el SDO se pueden ver en https://www.youtube.com/watch?v=mvPH_gDMarw&t=170s

- La irradiancia solar media incidente (W/m^2) sobre una superficie normal a la dirección Tierra-Sol ubicada en el tope de la atmósfera (**TOA**) cuando la Tierra esta a 1 UA del Sol es aproximadamente constante.

El Sol es prácticamente una fuente puntual para la Tierra:

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

es le valor convencional de la constante solar

- La irradiancia solar media incidente (W/m^2) sobre una superficie normal a la dirección Tierra-Sol ubicada en el tope de la atmósfera (**TOA**) cuando la Tierra esta a 1 UA del Sol es aproximadamente constante.
- Esta irradiancia es el punto de partida de todos los calculos de irradiación solar incidente en la superficie de la Tierra.

El Sol es prácticamente una fuente puntual para la Tierra:

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

es le valor convencional de la constante solar

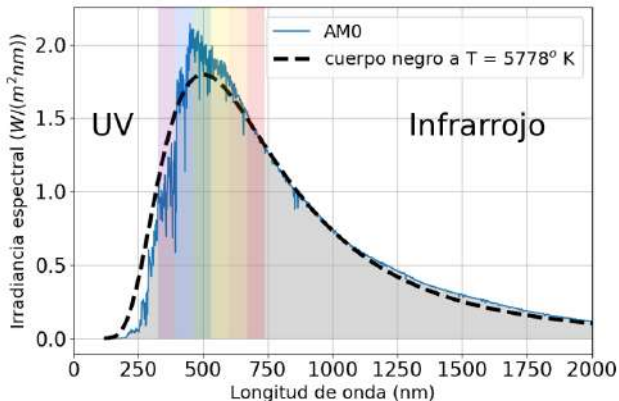
- La irradiancia solar media incidente (W/m^2) sobre una superficie normal a la dirección Tierra-Sol ubicada en el tope de la atmósfera (**TOA**) cuando la Tierra esta a 1 UA del Sol es aproximadamente constante.
- Esta irradiancia es el punto de partida de todos los calculos de irradiación solar incidente en la superficie de la Tierra.
- Sin embargo esta cantidad varía diariamente debido a la actividad solar y sigue los ciclos de 11 años de actividad del Sol.

El Sol es prácticamente una fuente puntual para la Tierra:

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

es le valor convencional de la constante solar

Distribución espectral TOA (AM0)



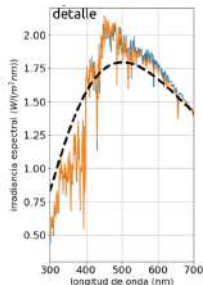
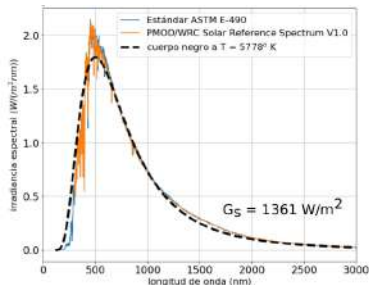
Estándar ASTM-E490 (<https://www.astm.org/e0490-22.html>)

Es uno de los espectros estandarizados para la irradiancia TOA espectral más usados. Su última actualización es de 2022

Obs: ASTM es una sociedad Estadounidense que desarrolla estándares y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos y servicios.

Espectros de irradiancia solar TOA de referencia

Espectros: ASTM E-490¹ y Wherli² (WRC, disponible en NREL³)



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
infrarrojo cercano	N-IR	700 - 3000	49.1	51.5
infrarrojo lejano o térmico	M-IR	3000 - 25k	2.1	2.0
	F-IR	25k - ∞	0.0	0.0

¹American Society for Testing and Materials, ASTM E-490, 2000

²Wehrli, C. Extraterrestrial Solar Spectrum, Publ.615, PMOD World Radiation Center, Davos,1985

³<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-wehrli.html>

- 1 El Sol y la constante solar
- 2 **Movimiento aparente del Sol**
- 3 Radiación en el tope de la atmósfera

La distancia Tierra-Sol es variable

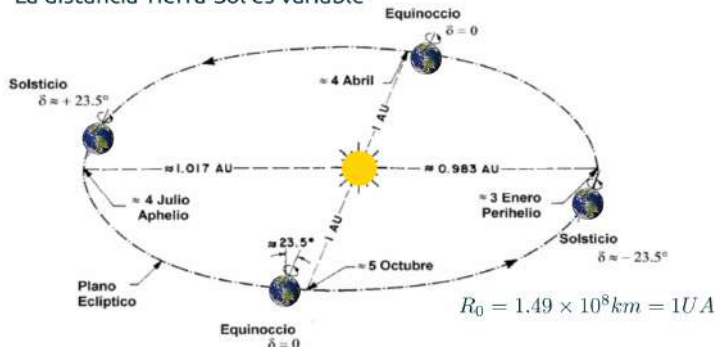


Figure: Plano de la eclíptica. Fuente: Duffie-Beckman

- Irradiancia TOA a una distancia R : $G_0 = \frac{\bar{P}}{4\pi R^2}$
- Irradiancia TOA a la distancia media (1 UA) R_0 : $G_s = \frac{\bar{P}}{4\pi R_0^2}$
- entonces $G_0 = G_s \left(\frac{R_0^2}{R^2} \right)$

- $f_n = \left(\frac{R_T^2}{R^2} \right)$ es denominado **factor de corrección orbital**
- A lo largo del año, la irradiancia TOA varía en $\pm 3.3\%$ por f_n

A partir de las propiedades de la órbita elíptica terrestre de excentricidad⁴ $\epsilon = 0.01671123$, se puede demostrar que

$$f_n = \frac{(1 + \epsilon \cos \varphi)^2}{1 - \epsilon^2} \simeq 1 + 2\epsilon \cos \varphi = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right)$$

- La fase de la Tierra en su órbita se parametriza en forma diaria: $\varphi = \frac{2\pi n}{365}$
- n es el ordinal-día: $n = 1, 2, 3, \dots, 365$.

En cálculos automatizados se utiliza la **parametrización de Spencer** (más precisa):

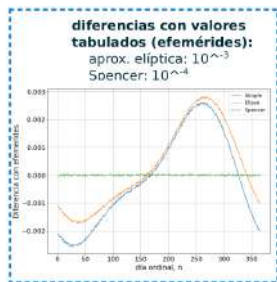
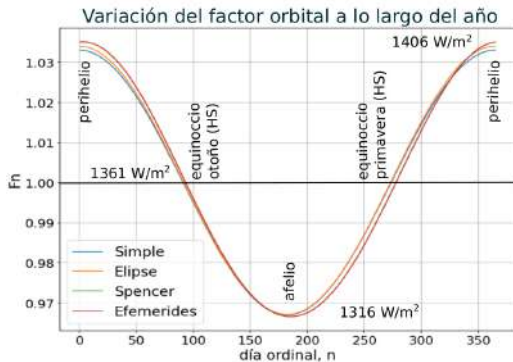
$$f_n = 1.000110 + 0.03421 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma),$$

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

⁴varia entre 0.00005 y 0.07 con período de 400k años. Lo asumimos constante

Factor de corrección orbital

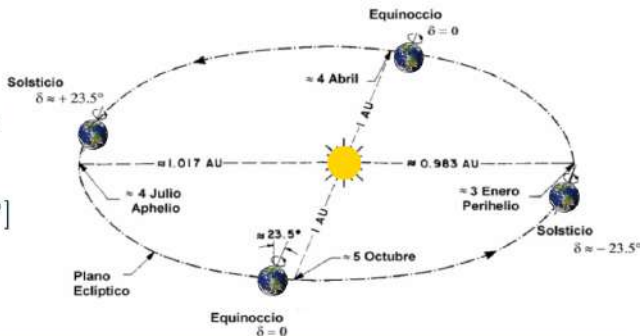
Parametrizaciones



f_n describe una variación de $\pm 45 \text{ W/m}^2$ en el valor de la irradiancia TOA ($\pm 3.3\%$)

Declinación solar:
Es el ángulo entre
los planos orbital
y ecuatorial

$$\delta \in [-23.5^\circ, 23.5^\circ]$$



Parametrizaciones:

Simple:
$$\delta = \delta_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

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

error
< 3' de arco

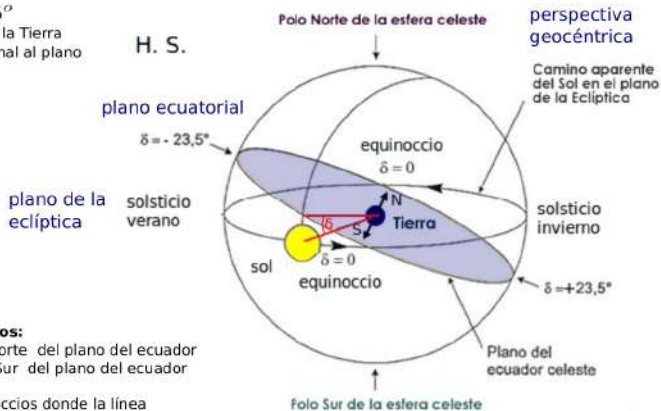
Declinación Solar

Perspectiva geocéntrica

Declinación solar:

ángulo de la línea Tierra-Sol con su proyección sobre plano ecuatorial

δ varía entre $\pm 23,5^\circ$
(inclinación del eje de la Tierra
con respecto a la normal al plano
de la eclíptica)



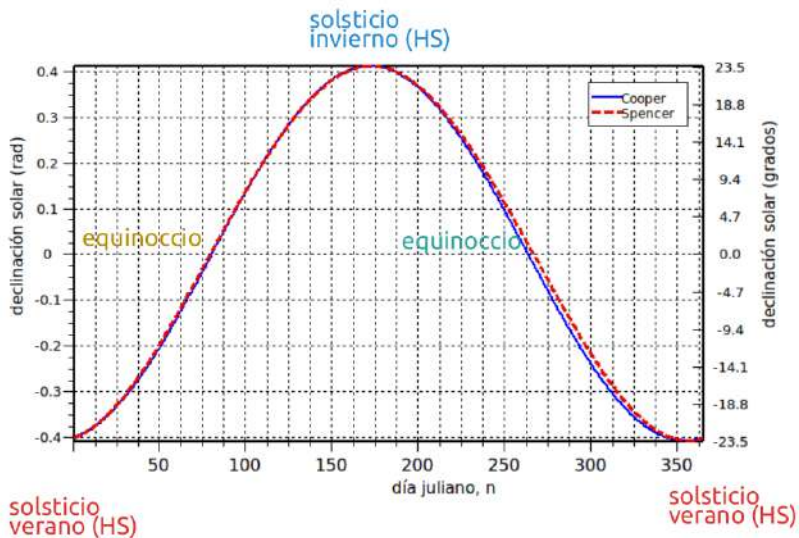
convención de signos:

positiva línea T-S al Norte del plano del ecuador
negativa línea T-S al Sur del plano del ecuador

Es cero en los equinoccios donde la línea T-s está en el plano del ecuador.

En el diagrama la Tierra rota con su centro fijo (una vuelta por día) y el Sol recorre un círculo durante un año.

Declinación Solar



Ángulo cenital solar y ángulo horario

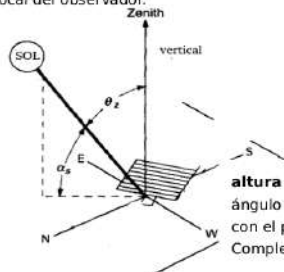
ángulo horario ω ($-\omega_S, \omega_S$)

el que forma el meridiano del Sol y el meridiano del observador sobre el plano ecuatorial.

Varía a tasa aproximadamente constante
 $= 360^\circ/24 \text{ h} = 15^\circ/\text{h}$ (negativo de mañana, cero a mediodía solar positivo en la tarde)

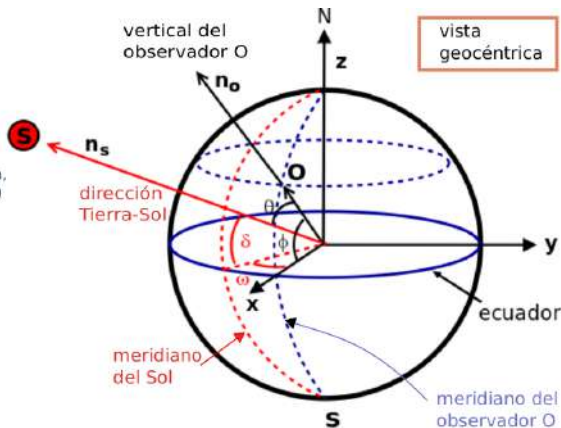
ángulo cenital θ_z ($0, 90^\circ$)

el que forma la línea Tierra-Sol con la vertical local del observador.



altura solar α_s ($0, 90^\circ$)

ángulo formado por la línea Tierra-Sol con el plano horizontal del observador.
Complemento del ángulo cenital



θ_z = ángulo cenital

ω = ángulo horario

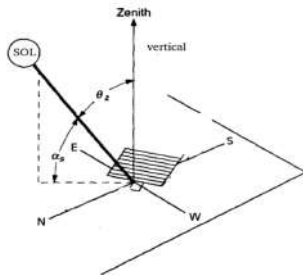
ϕ = latitud del observador O

Ángulo cenital solar y ángulo horario

El ángulo cenital solar es requerido para proyectar radiancias sobre un plano horizontal. Se puede demostrar que

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (1)$$

- A veces se utiliza la altura solar α_s . Se verifica $\sin \alpha_s = \cos \theta_z$
- Estos ángulos dependen de:
 - día del año (n), a través de la declinación solar
 - hora del día, a través del ángulo horario
 - latitud del observador (ϕ)



- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM \rightarrow ante-meridiano)

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM -> ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM -> post-meridiano)

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM -> ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM -> post-meridiano)

Mediodía Solar

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM -> ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM -> post-meridiano)

Propiedad:

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

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

Es decir

$$\theta_{zm}(n) = |\delta(n) - \phi|$$

Corolarios interesantes

Mediodía Solar

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM -> ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM -> post-meridiano)

Propiedad:

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

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

Es decir

$$\theta_{zm}(n) = |\delta(n) - \phi|$$

Corolarios interesantes

- Durante equinoccios θ_{zm} coincide con latitud

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM \rightarrow ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM \rightarrow post-meridiano)

Propiedad:

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

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

Es decir

$$\theta_{zm}(n) = |\delta(n) - \phi|$$

Corolarios interesantes

- Durante equinoccios θ_{zm} coincide con latitud
- El Sol alcanza el cenit únicamente para sitios entre trópicos.

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM \rightarrow ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM \rightarrow post-meridiano)

Propiedad:

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

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

Es decir

$$\theta_{zm}(n) = |\delta(n) - \phi|$$

Corolarios interesantes

- Durante equinoccios θ_{zm} coincide con latitud
- El Sol alcanza el cenit únicamente para sitios entre trópicos.
- El valor mínimo absoluto fuera de los trópicos se da en solsticio de verano

- $\omega = 0$ en el mediodía solar (cuando el meridiano del Sol coincide con el del observador).
- Por convención:
 - $\omega < 0$ en la mañana (Sol al Este del observador, AM \rightarrow ante-meridiano)
 - $\omega > 0$ en la tarde (Sol al Oeste del observador, PM \rightarrow post-meridiano)

Propiedad:

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

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

Es decir

$$\theta_{zm}(n) = |\delta(n) - \phi|$$

Corolarios interesantes

- Durante equinoccios θ_{zm} coincide con latitud
- El Sol alcanza el cenit únicamente para sitios entre trópicos.
- El valor mínimo absoluto fuera de los trópicos se da en solsticio de verano
- Su valor puede ser mayor a 90° en zonas polares (debajo del horizonte)

Amanecer y atardecer

- Suceden cuando $\cos \theta_z = 0$ (asumiendo horizonte plano y despejado de obstáculos).

Amanecer y atardecer

- Suceden cuando $\cos \theta_z = 0$ (asumiendo horizonte plano y despejado de obstáculos).
- Estos extremos del ángulo horario (ω_s) verifican

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi.$$

Amanecer y atardecer

- Suceden cuando $\cos \theta_z = 0$ (asumiendo horizonte plano y despejado de obstáculos).
- Estos extremos del ángulo horario (ω_s) verifican

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi.$$

- Tiene dos soluciones:

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

Amanecer y atardecer

- Suceden cuando $\cos \theta_z = 0$ (asumiendo horizonte plano y despejado de obstáculos).
- Estos extremos del ángulo horario (ω_s) verifican

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \tan \phi.$$

- Tiene dos soluciones:

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

- Esta expresión permite calcular la duración de un día...

Duración del día

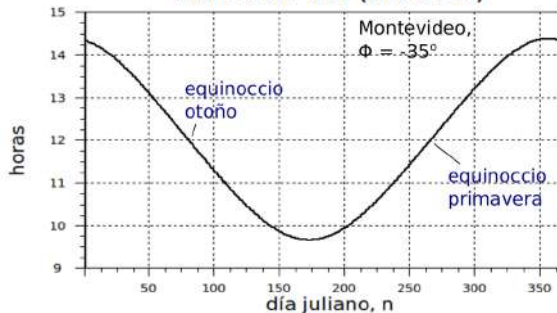
Duración del día en horas:

$$N_0(\phi, n) = \frac{12}{\pi} \times 2\omega_s = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

radianes!

depende de la latitud y el día juliano

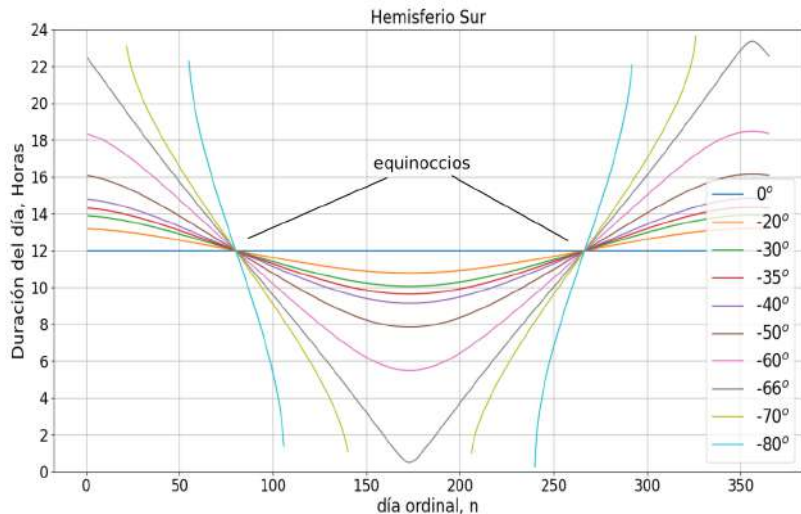
horas de sol (lat 35 S) H.S.



Montevideo:
varía entre 14.3 h en
verano y 9.7 h en
invierno, siendo 12 h
en los equinoccios.

Esto se usa para normalizar la heliofanía (medida de horas con Sol directo).

Duración del día en función de la latitud



- El ángulo horario varía a una tasa **aproximadamente** constante:

$$\frac{d\omega}{dt} = 15^\circ / \text{hora} = \frac{\pi}{12} \text{ rad} / \text{hora}$$

- El ángulo horario varía a una tasa **aproximadamente** constante:

$$\frac{d\omega}{dt} = 15^\circ / hora = \frac{\pi}{12} rad / hora$$

- Esto define el **tiempo solar aparente** o tiempo solar, T_s , (tiempo que mide un reloj de Sol):

$$T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) \text{ tiempo en horas y fracción}$$

- El ángulo horario varía a una tasa **aproximadamente** constante:

$$\frac{d\omega}{dt} = 15^\circ / \text{hora} = \frac{\pi}{12} \text{ rad} / \text{hora}$$

- Esto define el **tiempo solar aparente** o tiempo solar, T_s , (tiempo que mide un reloj de Sol):

$$T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) \text{ tiempo en horas y fracción}$$

- Duración del día solar: intervalo de tiempo entre dos pasajes consecutivos del meridiano del Sol por el meridiano del observador.

- El ángulo horario varía a una tasa **aproximadamente** constante:

$$\frac{d\omega}{dt} = 15^\circ / hora = \frac{\pi}{12} rad / hora$$

- Esto define el **tiempo solar aparente** o tiempo solar, T_s , (tiempo que mide un reloj de Sol):

$$T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) \text{ tiempo en horas y fracción}$$

- Duración del día solar: intervalo de tiempo entre dos pasajes consecutivos del meridiano del Sol por el meridiano del observador.
- Debido al movimiento en una órbita elíptica y a la inclinación de su eje de rotación con respecto al plano de la eclíptica, la Tierra **no rota a velocidad constante** y la duración del día solar difiere en unos minutos (mas o menos) de las 24 horas nominales.

- El ángulo horario varía a una tasa **aproximadamente** constante:

$$\frac{d\omega}{dt} = 15^\circ / \text{hora} = \frac{\pi}{12} \text{ rad/hora}$$

- Esto define el **tiempo solar aparente** o tiempo solar, T_s , (tiempo que mide un reloj de Sol):

$$T_s = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) \text{ tiempo en horas y fracción}$$

- Duración del día solar: intervalo de tiempo entre dos pasajes consecutivos del meridiano del Sol por el meridiano del observador.
- Debido al movimiento en una órbita elíptica y a la inclinación de su eje de rotación con respecto al plano de la eclíptica, la Tierra **no rota a velocidad constante** y la duración del día solar difiere en unos minutos (mas o menos) de las 24 horas nominales.
- Si suponemos que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12} \text{ rad/hora} = \text{cte.}$. Esto define el **tiempo solar medio**, T_0 , en el cual cada del año día dura 24 horas. La diferencia de algunos minutos entre tiempo solar y tiempo solar medio es la **ecuación del tiempo**, E :

$$E = T_s - T_0$$

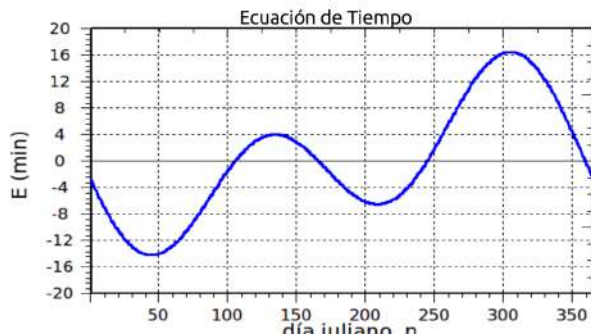
Ecuación del tiempo

La ecuación del tiempo es un efecto orbital y por tanto tiene una periodicidad anual

Parametrización de Spencer:

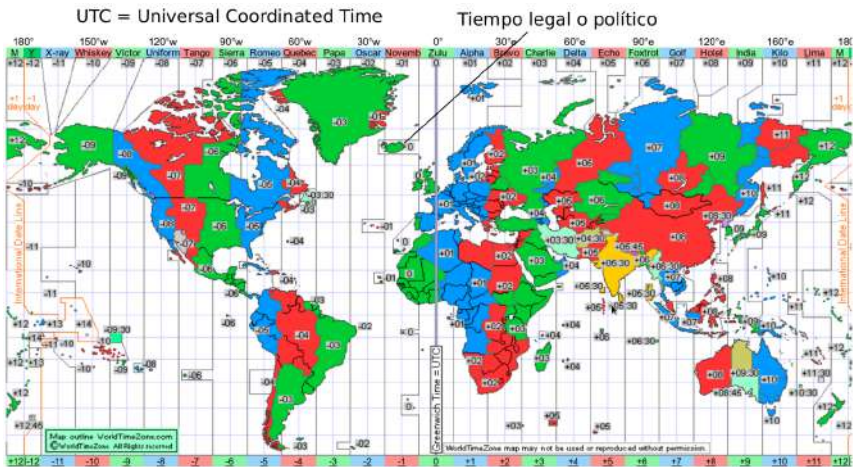
$$E \approx 229.18 \text{ min} \times [0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \sin(\Gamma) - 0,014615 \cos(2\Gamma) - 0,04089 \sin(2\Gamma)],$$

$\pm 0.6 \text{ min}$



La diferencia máxima $T_s - T_0$ ocurre en primavera (HS) y es de unos 17 min.

Hay 4 días al año en los que la duración del día es exactamente 24 horas



Zonas horarias: 24 husos horarios, de 15° de longitud cada uno, centrados en 0° , 15° , 30° ...
En colores: Tiempo Legal de cada zona.

- Corrección por longitud:

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}),$$

donde L_0 es la longitud local en grados y L_{UTC} longitud del huso horario UTC-X y el tiempo solar medio, T_0 , está en horas y fracción.

- Corrección por longitud:

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}),$$

donde L_0 es la longitud local en grados y L_{UTC} longitud del huso horario UTC-X y el tiempo solar medio, T_0 , está en horas y fracción.

- Recordando que $T_S - T_0 = E$, tenemos que

$$T_S = T_{UTC} + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E$$

- Corrección por longitud:

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}),$$

donde L_0 es la longitud local en grados y L_{UTC} longitud del huso horario UTC-X y el tiempo solar medio, T_0 , está en horas y fracción.

- Recordando que $T_S - T_0 = E$, tenemos que

$$T_S = T_{UTC} + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E$$

- **Tiempo estándar** a partir del ángulo horario:

$$T_{UTC} = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) - \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} - E$$

- Corrección por longitud:

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}),$$

donde L_0 es la longitud local en grados y L_{UTC} longitud del huso horario UTC-X y el tiempo solar medio, T_0 , está en horas y fracción.

- Recordando que $T_S - T_0 = E$, tenemos que

$$T_S = T_{UTC} + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E$$

- **Tiempo estándar** a partir del ángulo horario:

$$T_{UTC} = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) - \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} - E$$

- **Ángulo horario** a partir del tiempo estándar:

$$\omega = \frac{\pi}{12} \left[T_{UTC} - 12 + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E \right]$$

- Corrección por longitud:

$$T_0 = T_{UTC} + \frac{1}{15}(L_0 - L_{UTC}),$$

donde L_0 es la longitud local en grados y L_{UTC} longitud del huso horario UTC-X y el tiempo solar medio, T_0 , está en horas y fracción.

- Recordando que $T_S - T_0 = E$, tenemos que

$$T_S = T_{UTC} + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E$$

- **Tiempo estándar** a partir del ángulo horario:

$$T_{UTC} = 12 \left(1 + \frac{\omega}{\pi} \right) - \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} - E$$

- **Ángulo horario** a partir del tiempo estándar:

$$\omega = \frac{\pi}{12} \left[T_{UTC} - 12 + \frac{(L_0 - L_{UTC})}{15} + E \right]$$

- Esto último es útil porque datos meteorológicos vienen con etiqueta en tiempo estándar UTC-X. Además, el mov. aparente del Sol se describe fácilmente en función del ángulo horario, ω .

Movimiento aparente del Sol

Material adicional

Es un tema delicado.

Se recomienda leer las notas del curso Fundamentos del Recurso Solar, disponibles en http://les.edu.uy/FRS/notas/FRS_notas_v4-0_R2_2020.pdf

También se recomienda ver el video de divulgación:
<https://www.youtube.com/watch?v=IJhgZBn-LHg>

Ángulo acimutal y altura solar

Por último, es conveniente definir dos ángulos medidos desde el sistema de referencia del observador

Altura Solar:

ángulo complementario del ángulo cenital

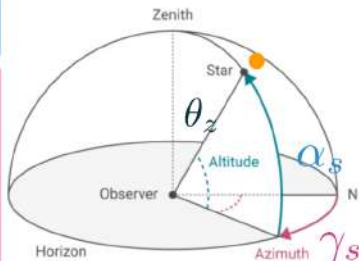
$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z$$

Ángulo acimutal:

ángulo entre la proyección en el plano del observador de la dir. Tierra-Sol y la dir. Norte.

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

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



Observaciones:

- γ_s es cero al mediodía solar, y su signo depende de la convención utilizada
- la variación de γ_s no ocurre a tasa constante
- cuando se calcula γ_s hay que tener claro en que cuadrante se está trabajando

- 1 El Sol y la constante solar
- 2 Movimiento aparente del Sol
- 3 Radiación en el tope de la atmósfera**

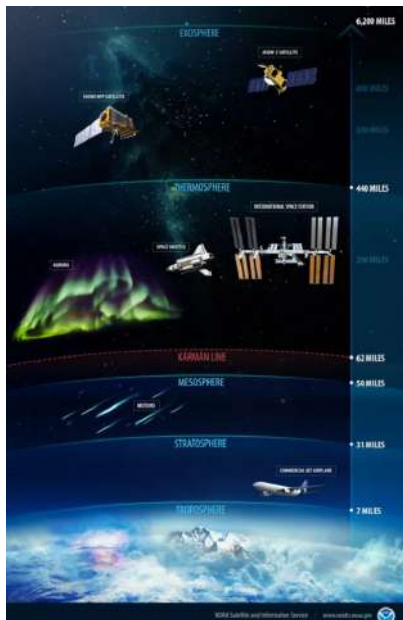
El tope de la atmósfera (TOA)



Los gases atmosféricos dispersan las longitudes de onda menores de la luz visible más que otras, dando al límite visible de la Tierra un halo azul. En altitudes cada vez más altas, la atmósfera se vuelve tan delgada que esencialmente deja de existir. Gradualmente, el halo atmosférico se desvanece en la negrura del espacio.

Foto: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/7373/the-top-of-the-atmosphere>

Topo de la atmósfera ¿Dónde es?

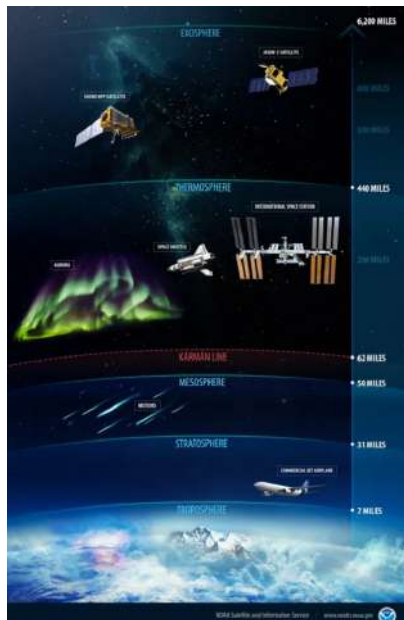


Límite de Karman

Se define como la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve tan baja que la velocidad de una aeronave para conseguir sustentación aerodinámica mediante alas y hélices debería ser equiparable a la velocidad orbital para esa misma altura.

- Valor convencional de 100 km.

Tope de la atmósfera ¿Dónde es?

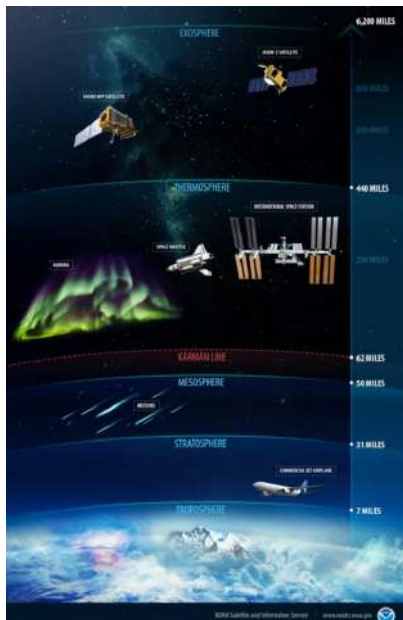


Límite de Karman

Se define como la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve tan baja que la velocidad de una aeronave para conseguir sustentación aerodinámica mediante alas y hélices debería ser equiparable a la velocidad orbital para esa misma altura.

- Valor convencional de 100 km.
- Definición adoptada por la Federación Aeronáutica Internacional

Topo de la atmósfera ¿Dónde es?

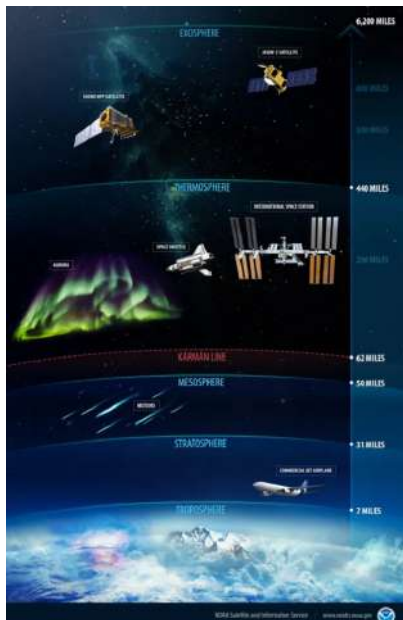


Límite de Karman

Se define como la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve tan baja que la velocidad de una aeronave para conseguir sustentación aerodinámica mediante alas y hélices debería ser equiparable a la velocidad orbital para esa misma altura.

- Valor convencional de 100 km.
- Definición adoptada por la Federación Aeronáutica Internacional
- Es un valor aproximado estimado.

Tope de la atmósfera ¿Dónde es?



Límite de Karman

Se define como la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve tan baja que la velocidad de una aeronave para conseguir sustentación aerodinámica mediante alas y hélices debería ser equiparable a la velocidad orbital para esa misma altura.

- Valor convencional de 100 km.
- Definición adoptada por la Federación Aeronáutica Internacional
- Es un valor aproximado estimado.
- No tiene ninguna implicancia física.

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

- Irradiancia TOA (en W/m^2):

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

- Irradiancia TOA (en W/m^2):
 - En incidencia normal: $F_0 = G_s f_n$

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

- Irradiancia TOA (en W/m^2):
 - En incidencia normal: $F_0 = G_s f_n$
 - Irradiancia en plano horizontal: $F_{0h} = F_0 \cos \theta_z = G_s f_n \cos \theta_z$

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

- Irradiancia TOA (en W/m^2):
 - En incidencia normal: $F_0 = G_s f_n$
 - Irradiancia en plano horizontal: $F_{0h} = F_0 \cos \theta_z = G_s f_n \cos \theta_z$
- Irradiación en un intervalo $[t_1, t_2]$ (en J/m^2): $Q_{0h} = \int_{t_1}^{t_2} F_0 \cos \theta_z dt$.

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

- Irradiancia TOA (en W/m^2):
 - En incidencia normal: $F_0 = G_s f_n$
 - Irradiancia en plano horizontal: $F_{0h} = F_0 \cos \theta_z = G_s f_n \cos \theta_z$
- Irradiación en un intervalo $[t_1, t_2]$ (en J/m^2): $Q_{0h} = \int_{t_1}^{t_2} F_0 \cos \theta_z dt$.

Observación (sin demostrar)

Si el intervalo es corto (menor a una hora), $Q_{0h} \simeq F_0 \cos \theta_z \Delta t$, con θ_z estimado en la mitad del intervalo. El error es menor al 0.3%.

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Usando que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12}$, tenemos

$$Q_{0h} = G_s f_n \frac{12}{\pi} \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \cos \theta_z d\omega,$$

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Usando que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12}$, tenemos

$$Q_{0h} = G_s f_n \frac{12}{\pi} \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \cos \theta_z d\omega,$$

Usando la expresión de $\cos \theta_z$,

$$Q_{0h} = \frac{24}{\pi} G_s f_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Usando que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12}$, tenemos

$$Q_{0h} = G_s f_n \frac{12}{\pi} \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \cos \theta_z d\omega,$$

Usando la expresión de $\cos \theta_z$,

$$Q_{0h} = \frac{24}{\pi} G_s f_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

- ω_s debe estar en radianes y se calcula como $\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Usando que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12}$, tenemos

$$Q_{0h} = G_s f_n \frac{12}{\pi} \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \cos \theta_z d\omega,$$

Usando la expresión de $\cos \theta_z$,

$$Q_{0h} = \frac{24}{\pi} G_s f_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

- ω_s debe estar en radianes y se calcula como $\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$
- Q_{0h} tiene un orden de magnitud de $\simeq 37 \text{ MJ/m}^2$ o 10 kW/m^2

Caso particular: Irradiación diaria

$$Q_{0h} = \int_{t(-\omega_s)}^{t(\omega_s)} F_0 \cos \theta_z dt,$$

Usando que $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{12}$, tenemos

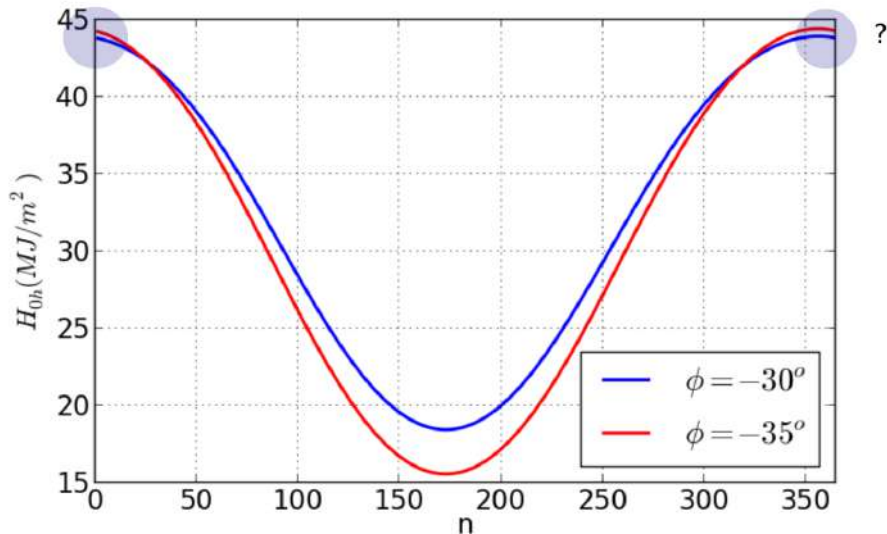
$$Q_{0h} = G_s f_n \frac{12}{\pi} \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} \cos \theta_z d\omega,$$

Usando la expresión de $\cos \theta_z$,

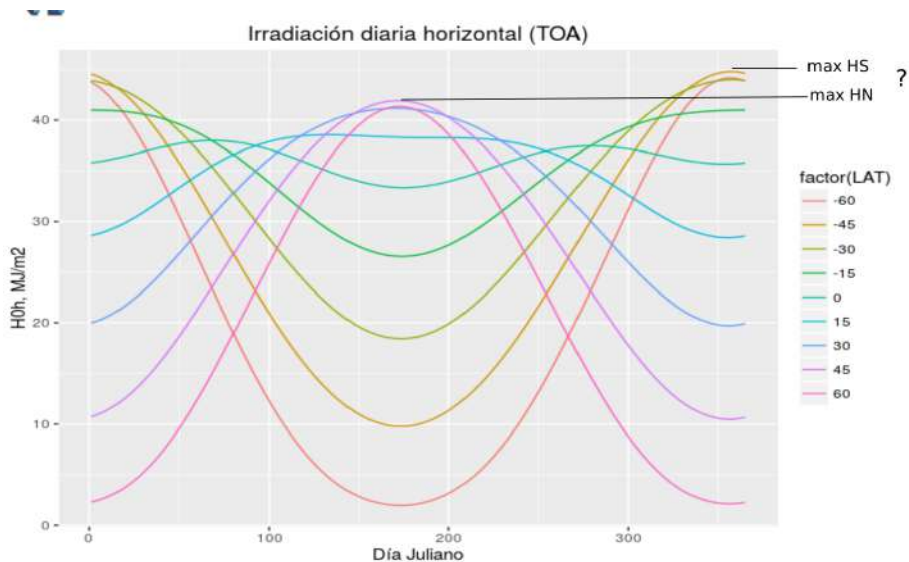
$$Q_{0h} = \frac{24}{\pi} G_s f_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

- ω_s debe estar en radianes y se calcula como $\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi)$
- Q_{0h} tiene un orden de magnitud de $\simeq 37 \text{ MJ/m}^2$ o 10 kW/m^2
- En promedio, del orden de la mitad de esta cantidad llega a la superficie por el efecto de la atmósfera

Irradiación diaria en plano horizontal TOA

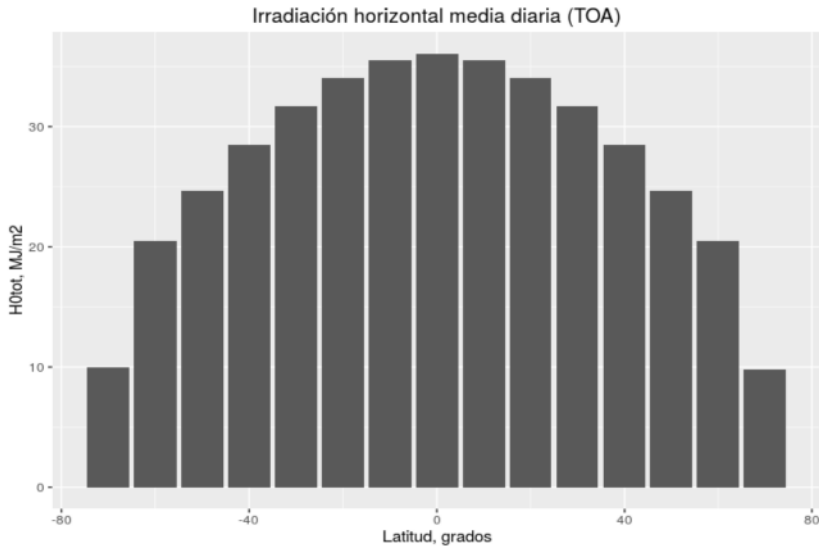


Irradiación diaria en plano horizontal TOA

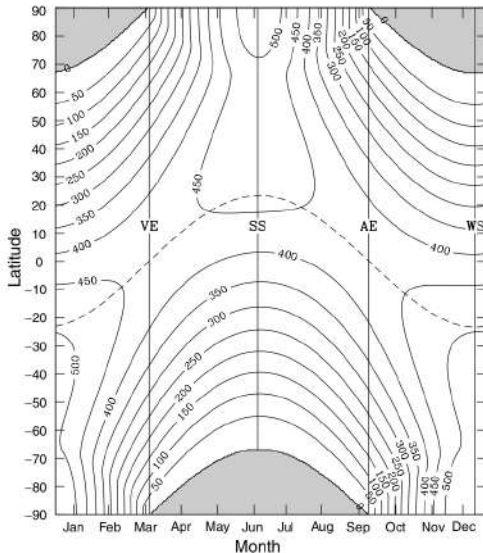


Irradiación diaria media en plano horizontal TOA

Total anual/365 días en función de la latitud



Distribución espacial y estacional



- Irradiación media anual en función de la latitud y el día del año en W/m^2 .
- Las zonas sombreadas denotan valores iguales a cero.
- Los solsticios (Hemisferio Norte) y equinoccios están indicados.
- La declinación solar es la línea punteada.

Variación de largo término de parámetros orbitales de la Tierra

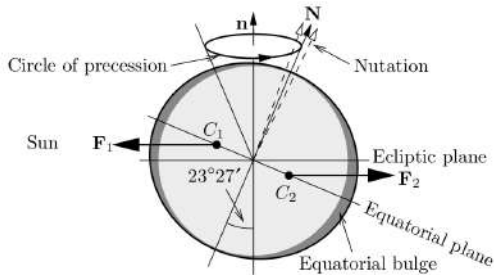


Fig. 1.12 Precession and nutation of the Earth.

- **Excentricidad de la órbita elíptica:** varía entre 0 y 0.05 de forma irregular, siendo el período de aprox. 100 mil años (actual de 0.017)

Variación de largo término de parámetros orbitales de la Tierra

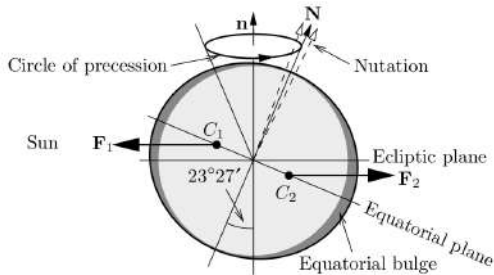


Fig. 1.12 Precession and nutation of the Earth.

- **Excentricidad de la órbita elíptica:** varía entre 0 y 0.05 de forma irregular, siendo el período de aprox. 100 mil años (actual de 0.017)
- **Precesión del eje rotacional de la tierra:** Rota formando un "cono" de ángulo de 23.45° con período de 25780 años debido a la gravedad del Sol y la Luna y forma Geoide de la Tierra (21 km más alto en el Ecuador)
- **Oblicuidad:** El efecto de otros planetas alteran la inclinación del eje de rotación con la eclíptica entre 21.92° y 24.30° (40 mil años de período)

Variación de largo término de parámetros orbitales de la Tierra

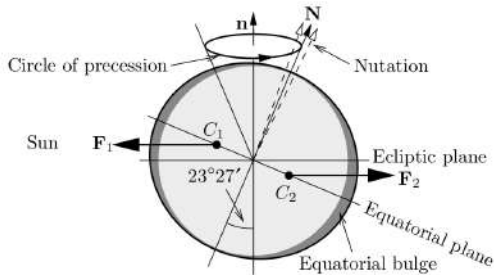


Fig. 1.12 Precession and nutation of the Earth.

- **Excentricidad de la órbita elíptica:** varía entre 0 y 0.05 de forma irregular, siendo el período de aprox. 100 mil años (actual de 0.017)
- **Precesión del eje rotacional de la tierra:** Rota formando un "cono" de ángulo de 23.45° con período de 25780 años debido a la gravedad del Sol y la Luna y forma Geoide de la Tierra (21 km más alto en el Ecuador)
- **Oblicuidad:** El efecto de otros planetas alteran la inclinación del eje de rotación con la eclíptica entre 21.92° y 24.30° (40 mil años de período)
- **Nutación:** Hay efectos pequeños de nutación en el eje debido a la variación de la influencia de la Luna (9 segs. de arco, período 18.6 años)

Variación de largo término de parámetros orbitales de la Tierra

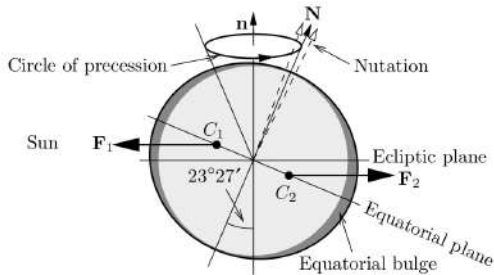


Fig. 1.12 Precession and nutation of the Earth.

- **Excentricidad de la órbita elíptica:** varía entre 0 y 0.05 de forma irregular, siendo el período de aprox. 100 mil años (actual de 0.017)
- **Precesión del eje rotacional de la tierra:** Rota formando un "cono" de ángulo de 23.45° con período de 25780 años debido a la gravedad del Sol y la Luna y forma Geoide de la Tierra (21 km más alto en el Ecuador)
- **Oblicuidad:** El efecto de otros planetas alteran la inclinación del eje de rotación con la eclíptica entre 21.92° y 24.30° (40 mil años de período)
- **Nutación:** Hay efectos pequeños de nutación en el eje debido a la variación de la influencia de la Luna (9 segs. de arco, período 18.6 años)

Variación de largo término de parámetros orbitales de la Tierra

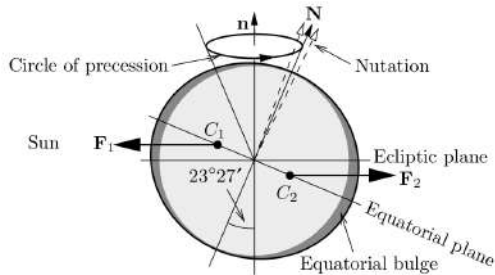


Fig. 1.12 Precession and nutation of the Earth.

- **Excentricidad de la órbita elíptica:** varía entre 0 y 0.05 de forma irregular, siendo el período de aprox. 100 mil años (actual de 0.017)
- **Precesión del eje rotacional de la tierra:** Rota formando un "cono" de ángulo de 23.45° con período de 25780 años debido a la gravedad del Sol y la Luna y forma Geoide de la Tierra (21 km más alto en el Ecuador)
- **Oblicuidad:** El efecto de otros planetas alteran la inclinación del eje de rotación con la eclíptica entre 21.92° y 24.30° (40 mil años de período)
- **Nutación:** Hay efectos pequeños de nutación en el eje debido a la variación de la influencia de la Luna (9 segs. de arco, período 18.6 años)

Fin