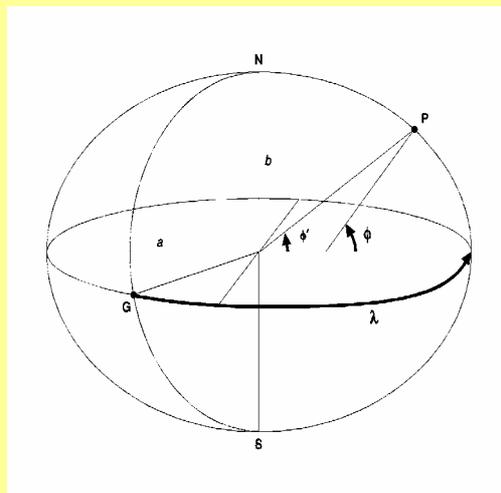


Geometría solar

Cálculos de radiación sobre superficies inclinadas

Coordenadas geográficas



VARIABLES DEL SISTEMA

Se definen a continuación todas las variables –tanto geográficas como temporales- que intervienen en un sistema solar, proponiendo en su caso las funciones matemáticas que las definen o aproximan y las relaciones entre ellas.

Todas las unidades de tiempo son horas y las angulares grados sexagesimales, salvo que se especifique expresamente lo contrario.

- Latitud Geográfica [ϕ]
Posición angular del lugar geográfico respecto al plano del ecuador. ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$), Norte positivo
- Longitud Geográfica [λ]
Relativa al Meridiano con longitud geográfica 0° . ($-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$), Hacia el este positiva y hacia el oeste negativa.
- Día Juliano [n]
Número de orden del día en el año a partir del 1 de Enero. Valor entre 1 y 365. No se tienen en cuenta los años bisiestos.

Día juliano

$$jd = (1461 \times (y + 4800 + (m - 14)/12))/4 + (367 \times (m - 2 - 12 \times ((m - 14)/12)))/12$$

•Angulo diario [Γ]:

Relativo a la posición de la Tierra en el plano de la eclíptica.

$$\Gamma = \frac{360}{365} \cdot (n - 1)$$

•Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol [ε]:

La distancia Tierra-Sol , r , varía a lo largo del año entorno a su valor medio $r_0=149.6 \cdot 10^6$ km. A esta distancia media r_0 , se le denomina Unidad Astronómica.

Definimos el factor de corrección como: $\varepsilon = (r_0/r)^2$

El cálculo de ε puede abordarse a través de cualquiera de las dos aproximaciones siguientes:

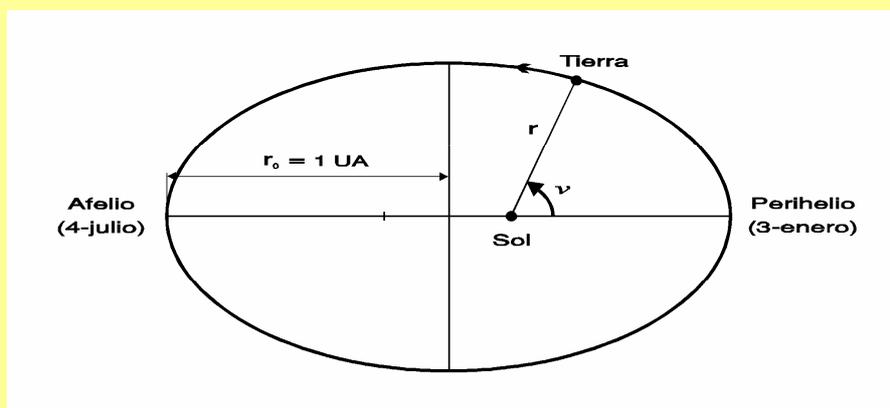
Spencer :

$$\varepsilon = 1.00011 + 0.0342 \cdot \cos(\Gamma) + 0.00073 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) + 0.00128 \cdot \text{sen}(\Gamma) + 0.000077 \cdot \text{sen}(2\Gamma)$$

Duffie y Beckman:

$$\varepsilon = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot n\right)$$

Posición de la Tierra sobre su órbita



año sidéreo, 365.25636 días.

Declinación [δ]

Angulo que forma la línea que une el centro de la Tierra y el centro del Sol con el plano del ecuador celeste. Depende únicamente del tiempo.

$$-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ.$$

•Anuario Astronómico.

•Valores aproximados (expresiones matemáticas sencillas).

•Bourges, intervalo 1960-2000, error máximo de 12':

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right) - 0.7580 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right) +$$

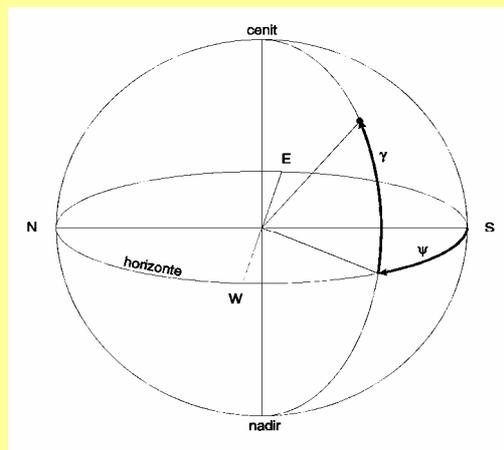
$$0.1149 \cdot \operatorname{sen}\left(2 \cdot \frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right) + 0.3656 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right) -$$

$$0.1712 \cdot \operatorname{sen}\left(3 \cdot \frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right) + 0.0201 \cdot \cos\left(3 \cdot \frac{360}{365} \cdot (n - 79.4360)\right)$$

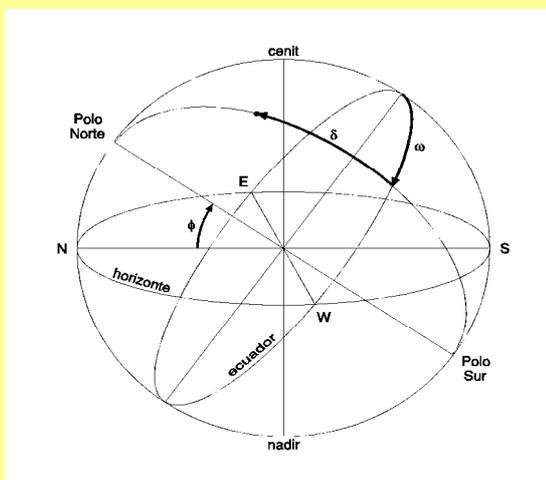
•Cooper (1969), error máximo de 1.5°:

$$\delta = 23.45 \cdot \operatorname{sen}\left[\frac{360}{365} \cdot (n + 284)\right]$$

Coordenadas celestes horizontales



Coordenadas celestes horarias



Mes	Día del año	Declinación(°)
Enero	17	- 20.84
Febrero	45	- 13.32
Marzo	74	- 2.40
Abril	105	+ 9.46
Mayo	135	+ 18.78
Junio	161	+ 23.04
Julio	199	+ 21.11
Agosto	230	+ 13.28
Septiembre	261	+ 1.97
Octubre	292	- 9.84
Noviembre	322	- 19.02
Diciembre	347	- 23.12

Angulo Horario [ω]

Desplazamiento angular del Sol en el plano del ecuador celeste. En la mañana ω será negativo, y positivo por la tarde.

$$\omega = \text{TSV} \cdot 15$$

Tiempo Solar Verdadero [TSV]

Tiempo basado en el movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste. A las 0:00 hora solar verdadera, el Sol atraviesa el meridiano del observador y alcanza la máxima altura sobre el horizonte. Así pues, el Tiempo Solar Verdadero comienza a contarse a partir del mediodía solar (mitad del día).

Ecuación del Tiempo [E_t]

Diferencia existente entre el día solar medio y el día solar verdadero (tiempo entre dos pasos consecutivos del sol por el meridiano del lugar). Esa diferencia es variable debido a la excentricidad de la órbita terrestre y a la constancia de la velocidad areolar (2ª ley de Kepler). También influyen otros movimientos del planeta Tierra (precesión y nutación sobre todo).

La aproximación a la Ecuación del Tiempo de Spencer (1971), con error máximo de unos 2.333 minutos es:

$$E_t = \frac{229,2}{60} \cdot [0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0,032077 \cdot \text{sen}(\Gamma) - 0,014615 \cdot \cos(2 \cdot \Gamma) - 0,04089 \cdot \text{sen}(2 \cdot \Gamma)]$$



Tiempo Oficial [TO]

Es el que establece un país dependiendo de su normativa legal.

El Tiempo Oficial en la España Peninsular no se corresponde con el Tiempo Local Estándar estipulado para el huso horario que denominamos CERO cuyo centro está determinado por el meridiano 0. Por cuestiones legales, durante todo el año, el Tiempo Oficial se adelanta una hora con respecto al Tiempo Local Estándar correspondiente al huso horario CERO, para hacerse coincidir con el del huso horario UNO. En los meses centrales del año además, se adelanta el Tiempo Oficial en otra hora adicional.

$$TO = TLE + 2 \quad (\text{España Peninsular Horario de Verano})$$

$$TO = TLE + 1 \quad (\text{España Peninsular Horario de Invierno})$$

Queda entonces,

$$TO = TSV - E_t + 12 - \lambda / 15 + 2 \quad (\text{España Peninsular Horario Verano})$$

$$TO = TSV - E_t + 12 - \lambda / 15 + 1 \quad (\text{España Peninsular Horario Invierno})$$

Angulo Horario de la salida y la puesta del sol [ω_s]

Es el ángulo horario correspondiente a la aparición y la desaparición del Sol en el plano del horizonte. Sus valores absolutos son idénticos. Se adopta el criterio de establecer como positivo el ángulo horario de la puesta y como negativo el de la salida. Obviamente se calcula sin más que poner igual a cero la altura solar (o 90 grados el ángulo cenital)

$$\omega_s = \text{acos} [(-\tan(\delta)) \cdot \tan(\phi)]$$

Angulo Cenital del Sol [θ_z]

El ángulo cenital es aquel que forma la vertical del observador con la línea observador – Sol. Se calcula empleando la expresión del ángulo de incidencia con la simplificación correspondiente.

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta)$$

Altura del Sol [α]

Es el complementario del ángulo cenital $\alpha = 90^\circ - \theta$

Angulo Acimutal del Sol [γ]

Es el ángulo diedro que forma el meridiano del lugar (incluye la vertical del lugar y pasa por el sur geográfico) con el que pasa por el sol. Sobre el plano del horizonte produce un ángulo llano con el mismo nombre. El acimut hacia el Este es negativo, y hacia el Oeste positivo.

La posición del Sol queda determinada por el ángulo cenital (o la altura solar) y el acimut. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\omega) \cdot \cos(\delta)}{\text{sen}(\theta)}$$

Cálculo de la irradiancia e irradiación solar extraterrestre

La irradiancia solar sobre un plano horizontal en la superficie terrestre en ausencia de atmósfera (irradiancia extraterrestre) viene afectada por la corrección de la distancia Tierra-Sol (ε) y por el ángulo que forma los rayos solares con el plano horizontal (altura α)

$$I_o = I_{CS} \varepsilon \operatorname{sen} \alpha$$

$$I_o = I_{CS} \varepsilon (\operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)$$

Para el cálculo de la irradiación, se ha de integrar la irradiancia en el tiempo y, con un cambio de variable, con el ángulo horario como variable.

$$H_o = \int_{t_1}^{t_2} I_o dt = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_o d\omega$$

Transmisión por difusión (cambio de dirección) de las moléculas de aire

$$\tau_r = \exp \left[-0,0903 m_a^{0,84} (1 + m_a - m_a^{1,01}) \right] \quad m_a = \frac{P_T m_{rel}}{101325}$$

$$P_T = 101325 e^{-0,0001184 z} \quad z = \text{altura sobre el nivel del mar}$$

