

# Radiación Solar

---

## Naturaleza de la radiación solar

- Directa, difusa, albedo

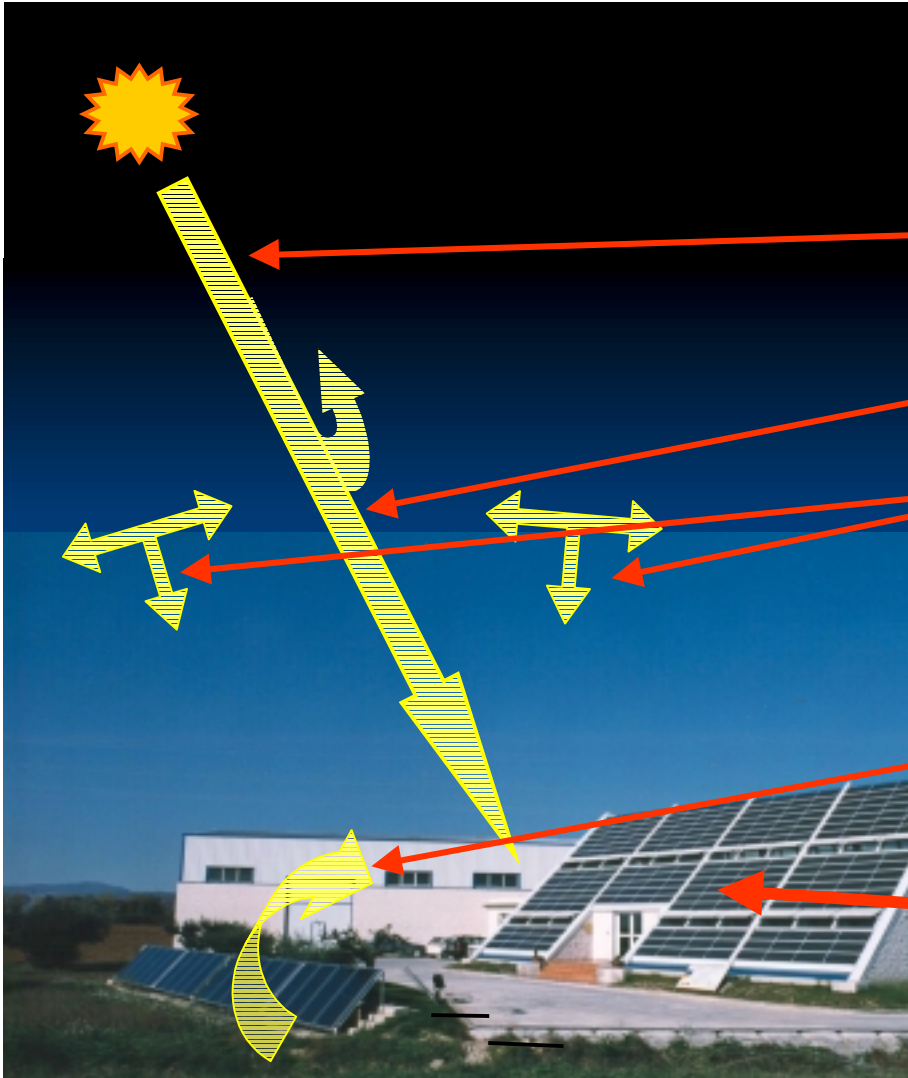
## Movimiento Sol-Tierra

- Sistemas de referencia
- Posición del sol
- Hora solar - Hora oficial. Ecuación de tiempo
- Angulo de incidencia

## Componentes de la radiación

- Nomenclatura
- Índice de claridad y Fracción de difusa
- Correlaciones
- Cálculo de la irradiancia sobre una superficie arbitrariamente orientada
  - ➔ Irradiancia Directa, Irradiancia Difusa anisotrópica, Irradiancia Reflejada
- Cálculo de la irradiación diaria

# Directa, Difusa, Reflejada



**Irradiancia:** Potencia por unidad de superficie ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

**Irradiación:** Energía por unidad de superficie ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

- **Extraatmosférica:** Fuera de la atmósfera
- **Directa:** Procede del sol y depende de su posición
- **Difusa:** Procede de la atmósfera y es la consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción
- **Reflejada:** Procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno
- **Global = Directa + Difusa + Reflejada:** Radiación total incidente sobre una superficie

# Naturaleza de la radiación solar

## Dispersión



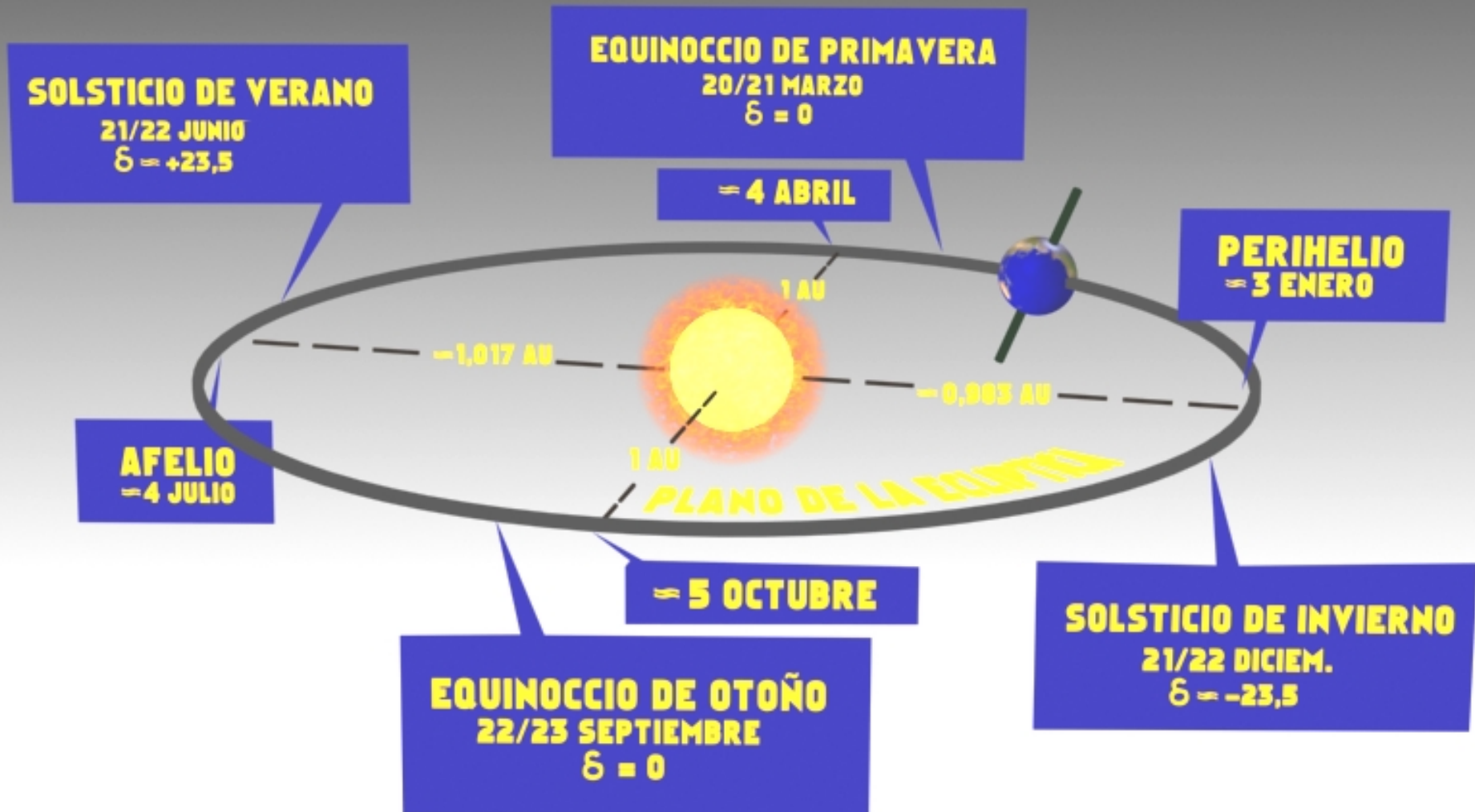
## Reflexión



## Difracción



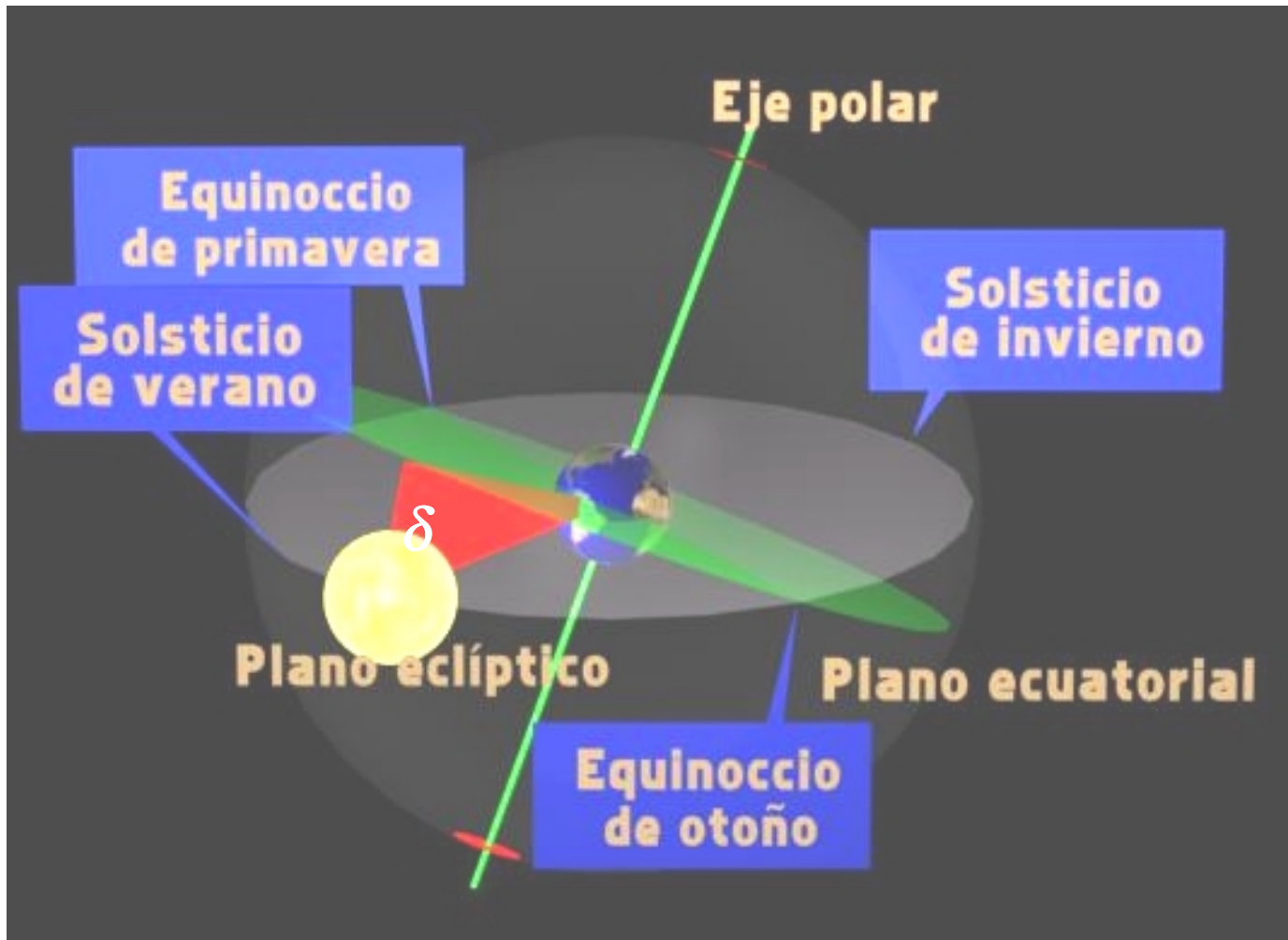
# MOVIMIENTO DE LA TIERRA ALREDEDOR DEL SOL



# Declinación solar

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right]$$

$$d_n = 1, 2, \dots, 365$$



# Posición del sol respecto a un punto de la Tierra

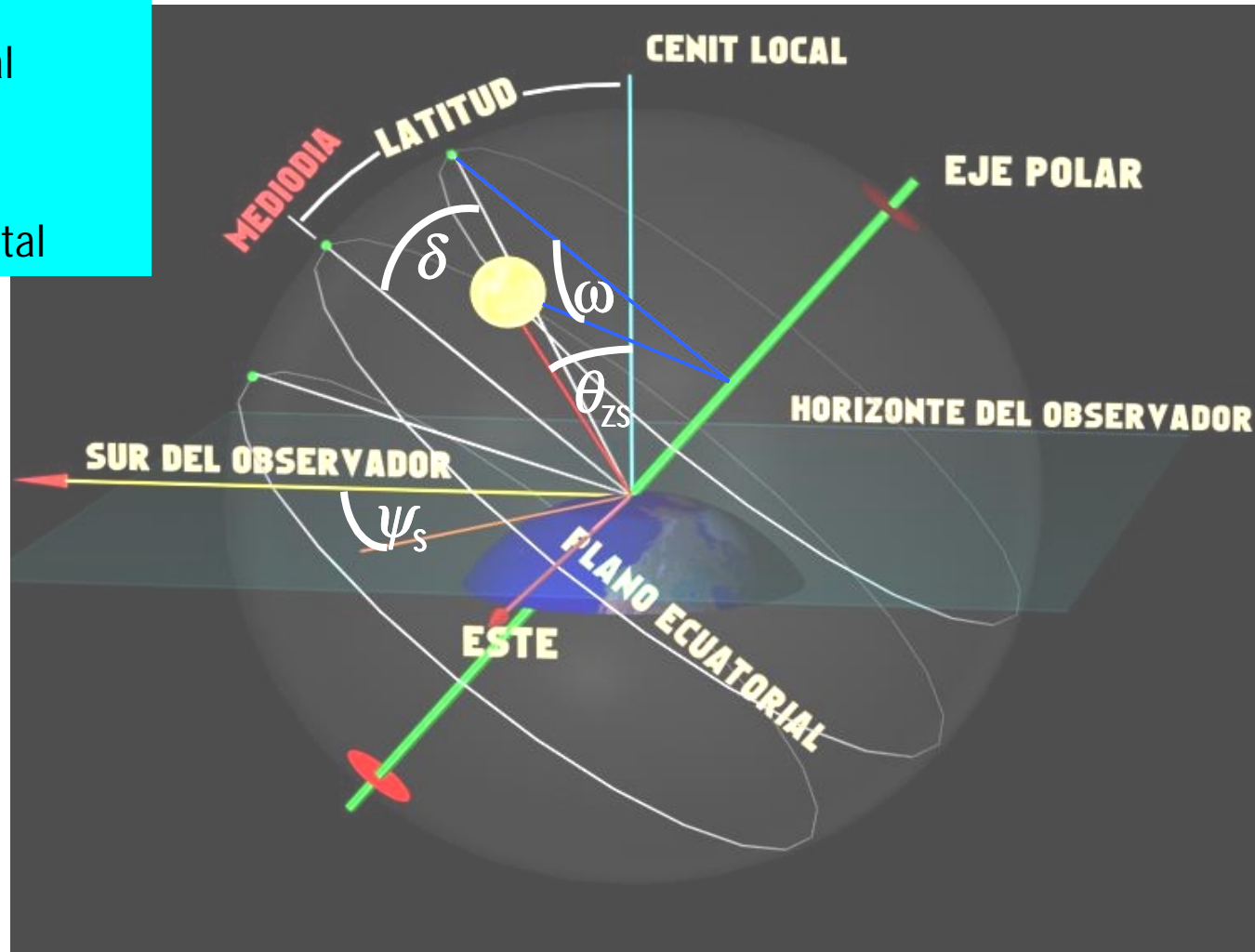
$\delta$  = declinación

$\omega$  = ángulo solar horario

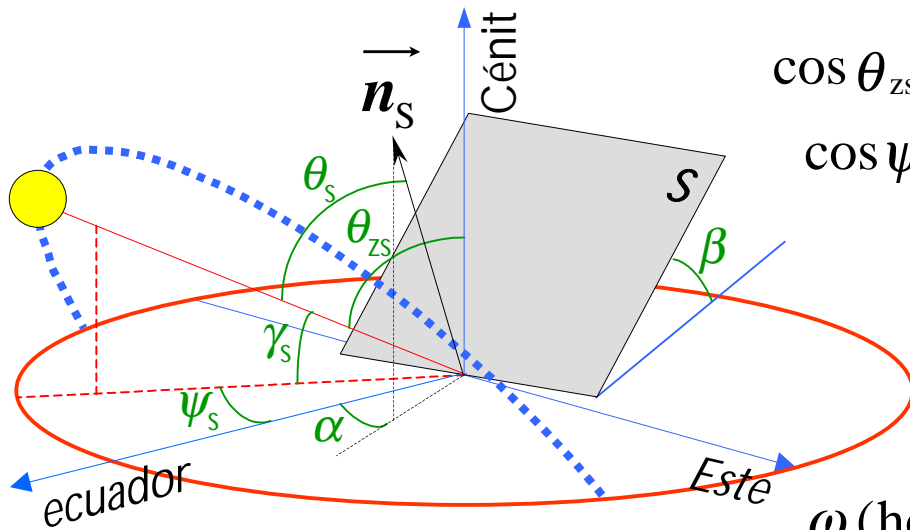
$\theta_{zs}$  = ángulo cenital

$\gamma_s$  = elevación

$\psi_s$  = ángulo acimutal



# Ecuaciones de posición del sol y de la superficie colectora



$$\cos \theta_{zs} = \text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \text{sen } \gamma_s$$

$$\cos \psi_s = (\text{sen } \gamma_s \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta) / (\cos \gamma_s \cos \phi)$$

$$\omega \text{ (horas)} = \text{TO} - 12 + \text{ET} - \text{AO} - (\text{LL} - \text{LH}) / 15$$

$$\theta_{zs} = 0 \text{ (amanecer)} \Rightarrow \omega_s = -\text{arc cos} (-\text{tg } \delta \text{ tg } \phi)$$

## ■ *Ángulo de incidencia*

$\alpha$  acimut de la superficie de captación  $S$

$\beta$  elevación de  $S$

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha + \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \cos \alpha \cos \omega + \\ & + \cos \delta \text{ sen } \alpha \text{ sen } \omega \text{ sen } \end{aligned}$$

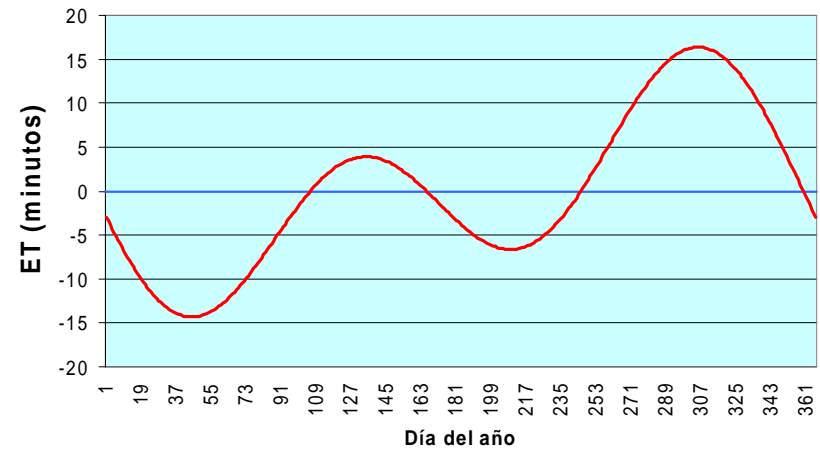
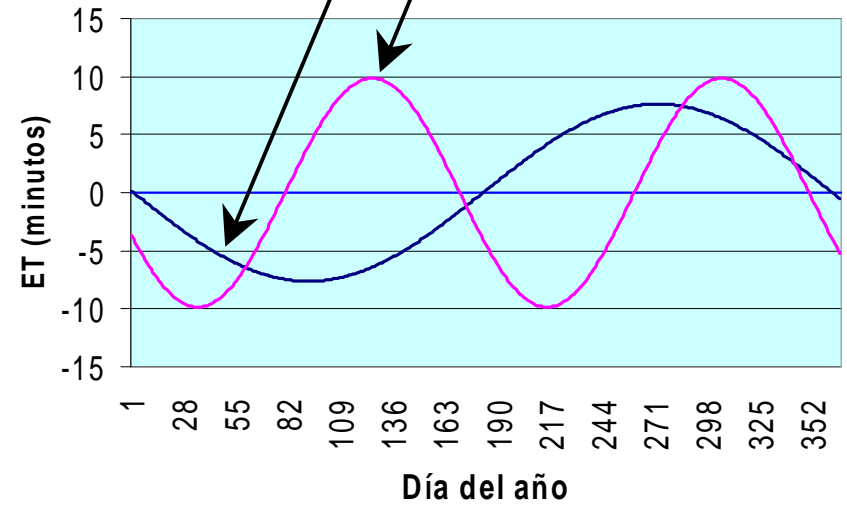
$$\alpha = 0 \Rightarrow \cos \theta_s = \text{sen } \delta \text{ sen } (\phi - \beta) + \cos \delta \cos (\phi - \beta) \cos \omega$$

# La Ecuación de Tiempo



Trayectoria elíptica

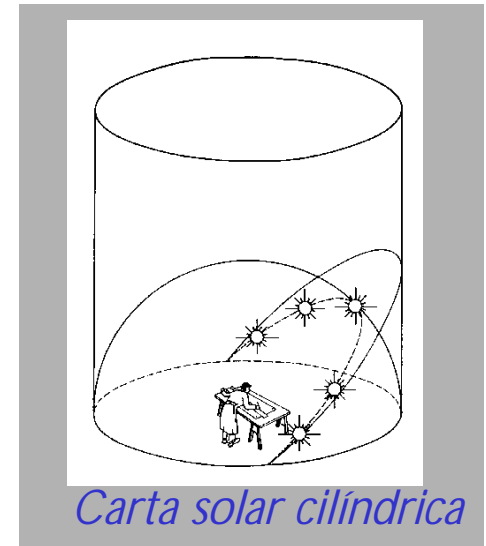
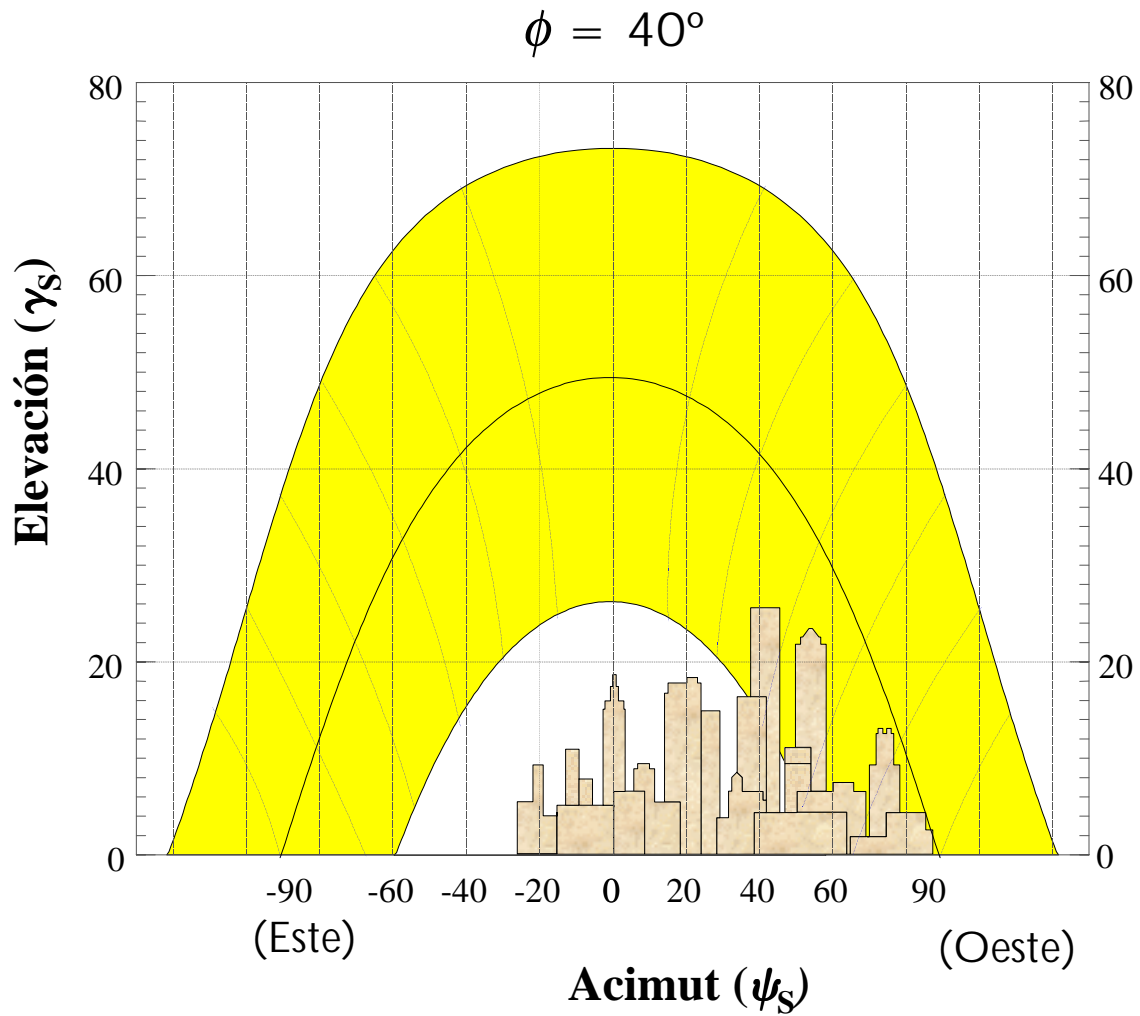
Inclinación del eje polar



$$ET = -7,64 \operatorname{sen}(d - 2) + 9,86 \operatorname{sen}[2(d - 80)]$$



# Plano de sombras



# Estimación de las componentes de la radiación solar

- ✓ Cálculo de la irradiación extraatmosférica
- ✓ Datos de valores globales sobre superficie horizontal
- ✓ Cálculo de las componentes sobre superficie horizontal
- ✓ Cálculo de la irradiación sobre una superficie arbitrariamente orientada

## Nomenclatura

- Extraatmosférica ( $B_0$ )
- Directa ( $B$ )
- Difusa ( $D$ )
- Reflejada ( $R$ )
- Global ( $G$ )

## Subíndices

- irradiancia
- h irradiación horaria
- d irradiación diaria
- m irradiación media

## Ejemplos:

- $G(0)$  irradiancia global sobre superficie horizontal
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$  irradiación global diaria media sobre  $S$
- $B(90)$  irradiancia directa sobre una superficie vertical orientada al ecuador

# Radiación Extraatmosférica

---

$$\varepsilon_o = (r_o / r)^2 = 1 + 0,033 \cos(360 d_n / 365)$$

$$B_{Oh}(0) = B_o \varepsilon_o \cos \theta_{zS} \quad d_n = 1,2,\dots,365$$

$$B_{Od}(0) = \frac{24}{\pi} B_o \varepsilon_o (\cos \phi \cos \delta) (\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s)$$

# Irradiación global

---

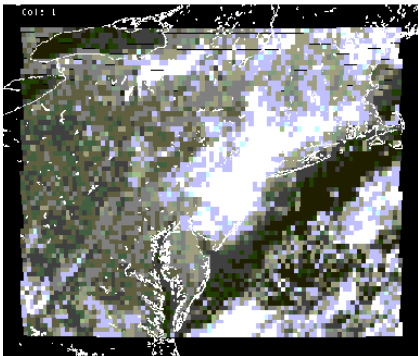
## ■ Medidas directas



## ■ Medidas indirectas

- Horas de sol

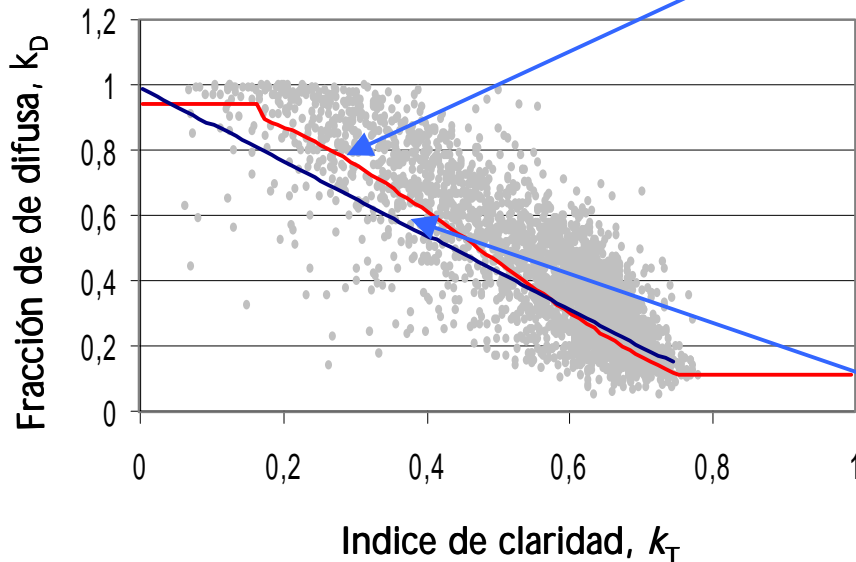
- Satélite



# Indice de claridad y fracción de difusa

$$K_T = \frac{\text{Radiación global}}{\text{Radiación extraatmosférica}}$$

$$K_D = \frac{\text{Radiación difusa}}{\text{Radiación global}}$$



● Correlación diaria,  $K_T = G_D(0)/B_{OD}(0)$   
 $K_D = D_D(0)/G_D(0)$

$$K_D = 0,942 \quad \text{para } K_T < 0,18$$

$$K_D = 0,947 + 0,3256 K_T - 3,896 K_T^2 + 2,661 K_T^3$$

para  $0,18 \leq K_T \leq 0,79$

$$K_D = 0,115 \quad \text{para } K_T \geq 0,79$$

● Correlación diaria media mensual

$$K_{Tm} = G_{Dm}(0)/B_{ODm}(0)$$

$$K_{Dm} = D_{Dm}(0)/G_{Dm}(0)$$

$$K_{Dm} = 1 - 1,13 K_{Tm}$$

# Irradiación Horaria a partir de la Irradiación Diaria

---

$$\mathbf{r_d} = \mathbf{D_{hm} (0) / D_{dm} (0)} \quad \mathbf{r_g} = \mathbf{G_{hm} (0) / G_{dm} (0)}$$

$$\mathbf{r_d} = \frac{\pi}{T} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s}$$

$$\mathbf{r_g} = \frac{\pi}{T} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s}$$

$$\mathbf{a} = 0,409 - 0,5016 \text{ sen } (\omega_s + 1,047)$$

$$\mathbf{b} = 0,6609 + 0,4767 \text{ sen } (\omega_s + 1,047)$$

# Cálculo de la irradiancia

$$G(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) + D(\beta, \alpha) + R(\beta, \alpha)$$

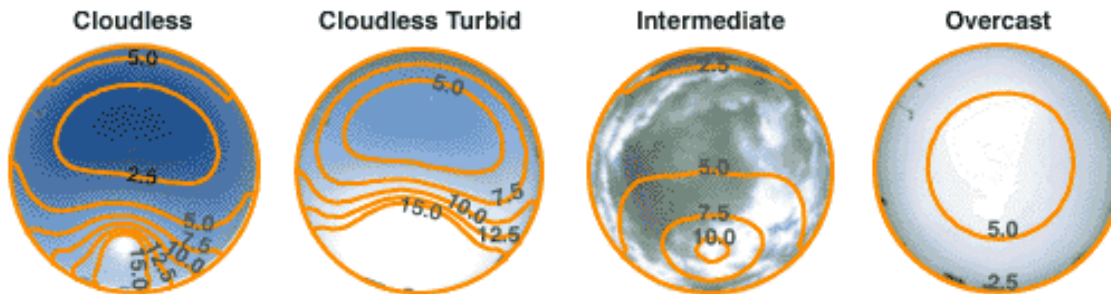
- Irradiancia Directa  $B(\beta, \alpha) = B \max(0, \cos \theta_s)$

- Irradiancia Difusa  $D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha)$

$$D^I(\beta, \alpha) = D(0)(1 - k_2) \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

$$D^C(\beta, \alpha) = \frac{D(0) k_2}{\cos \theta_{zs}} \max(0, \cos \theta_s)$$

$$k_2 = \frac{B}{B_0 \epsilon_0} = \frac{G(0) - D(0)}{B_0 \epsilon_0 \cos \theta_{zs}}$$



ASRC -CIE Luminance distribution for the four basic models (kcd/m<sup>2</sup>)

- Irradiancia Reflejada

$$R(\beta, \alpha) = G(0)(1 - \cos \beta) \rho / 2$$

# Irradiación diaria sobre Superficies Inclinadas

---

Para superficies orientadas al sur ( $\alpha=0$ ):

$$G_{\text{dm}}(0) \longrightarrow R_{\text{dm}}(\beta) = \rho \cdot G_{\text{dm}}(0) \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

$$D_{\text{dm}}(0) \longrightarrow D_{\text{dm}}(\beta) = D_{\text{dm}}(0) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2}$$

$$B_{\text{dm}}(0) \longrightarrow B_{\text{dm}}(\beta) = R_B \cdot B_{\text{dm}}(0)$$

$$R_B = \frac{\omega_{\text{ss}} \cdot \text{sen } \delta \cdot \text{sen}(\phi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \text{sen } \omega_{\text{ss}}}{\omega_s \cdot \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen } \omega_s}$$

$$\omega_{\text{ss}} = \text{Max}[\omega_s, -\arccos(-\tan \delta \cdot \tan(\phi - \beta))]$$

$$\omega_s, \omega_{\text{ss}} \text{ (rad)}$$

\* En los equinoccios ( $\delta = 0$ ): 
$$R_B = \frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi}$$