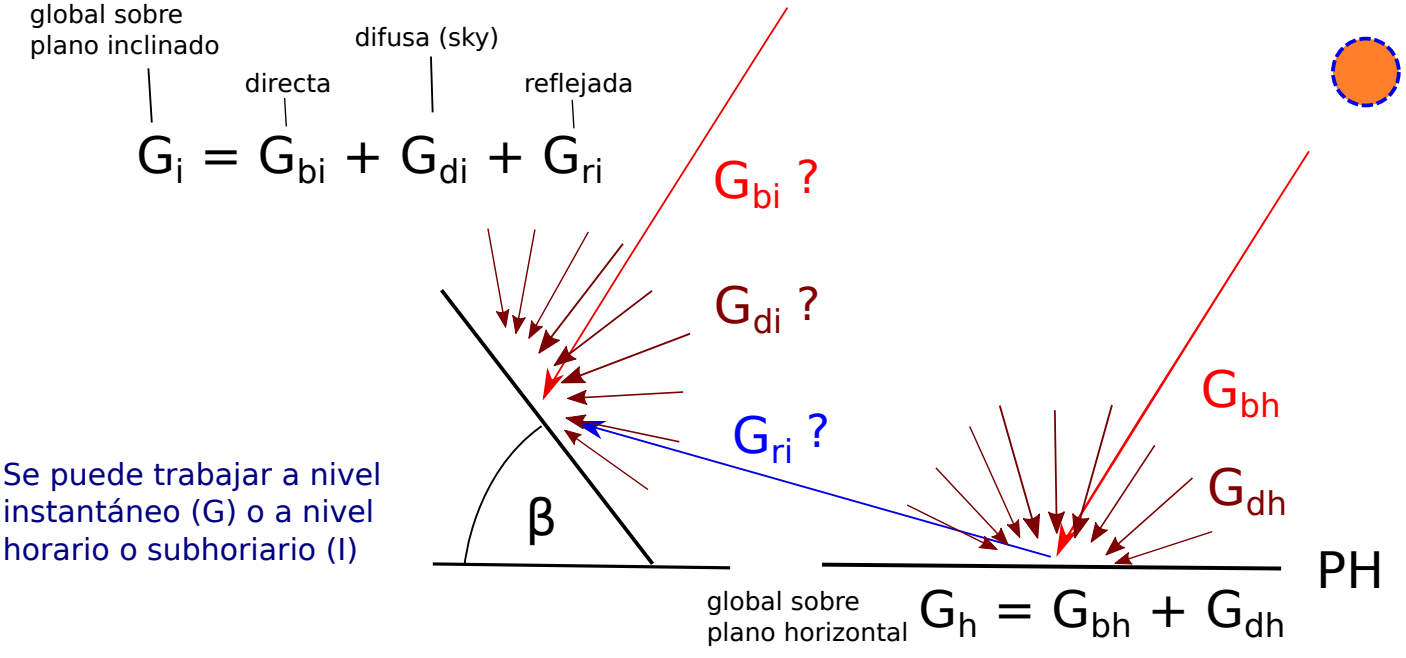
Unidad 4: Transporte a plano inclinado

P1: modelos de transporte - irradiación horaria y sub-horaria

P2: modelos de transporte - irradiación diaria

# El problema del transporte de irradiancia

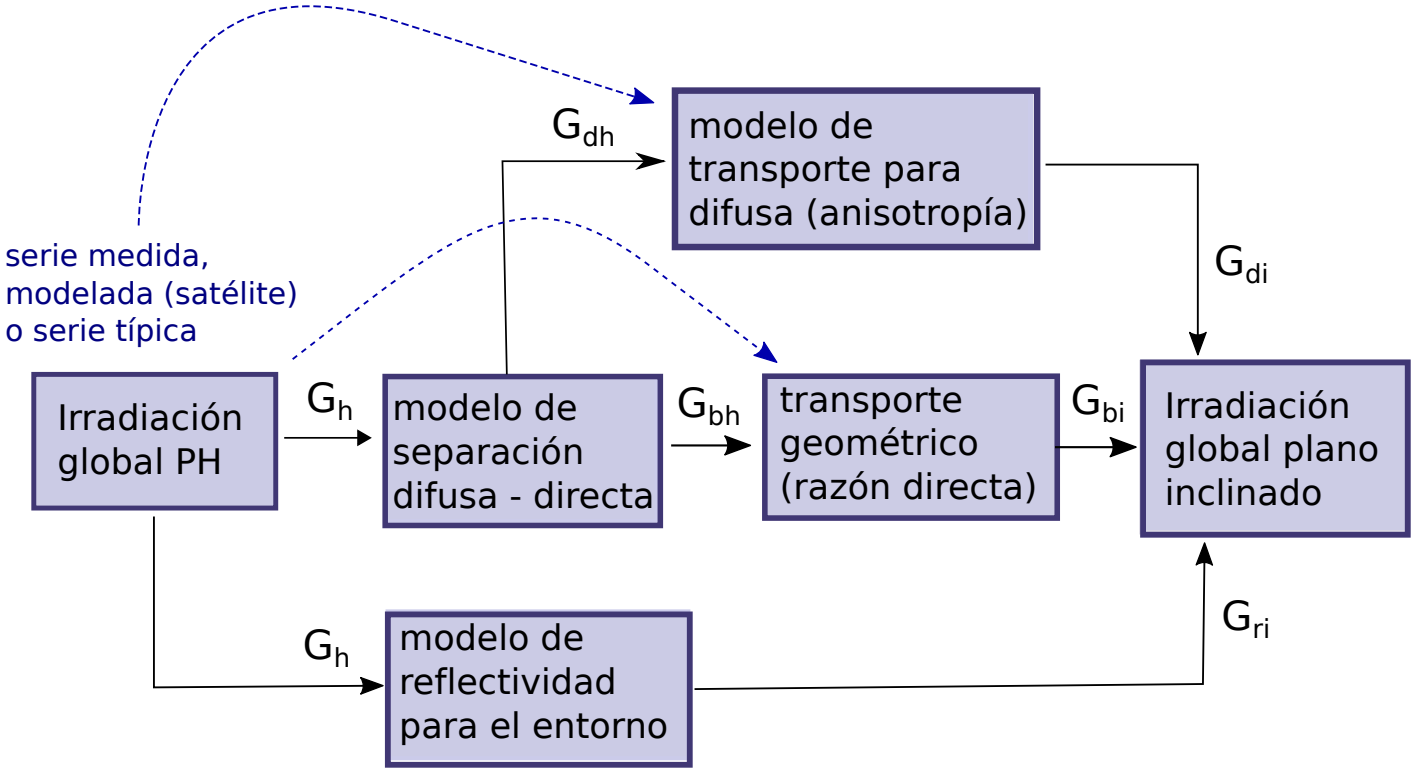



Se puede trabajar a nivel instantáneo (G) o a nivel horario o subhoriario (I)

Dada la irradiación horaria (subhoraria) en PH, $G_h$ y sus componentes $G_{bh}$ y $G_{dh}$ como calcular la irradiación sobre un plano inclinado ?

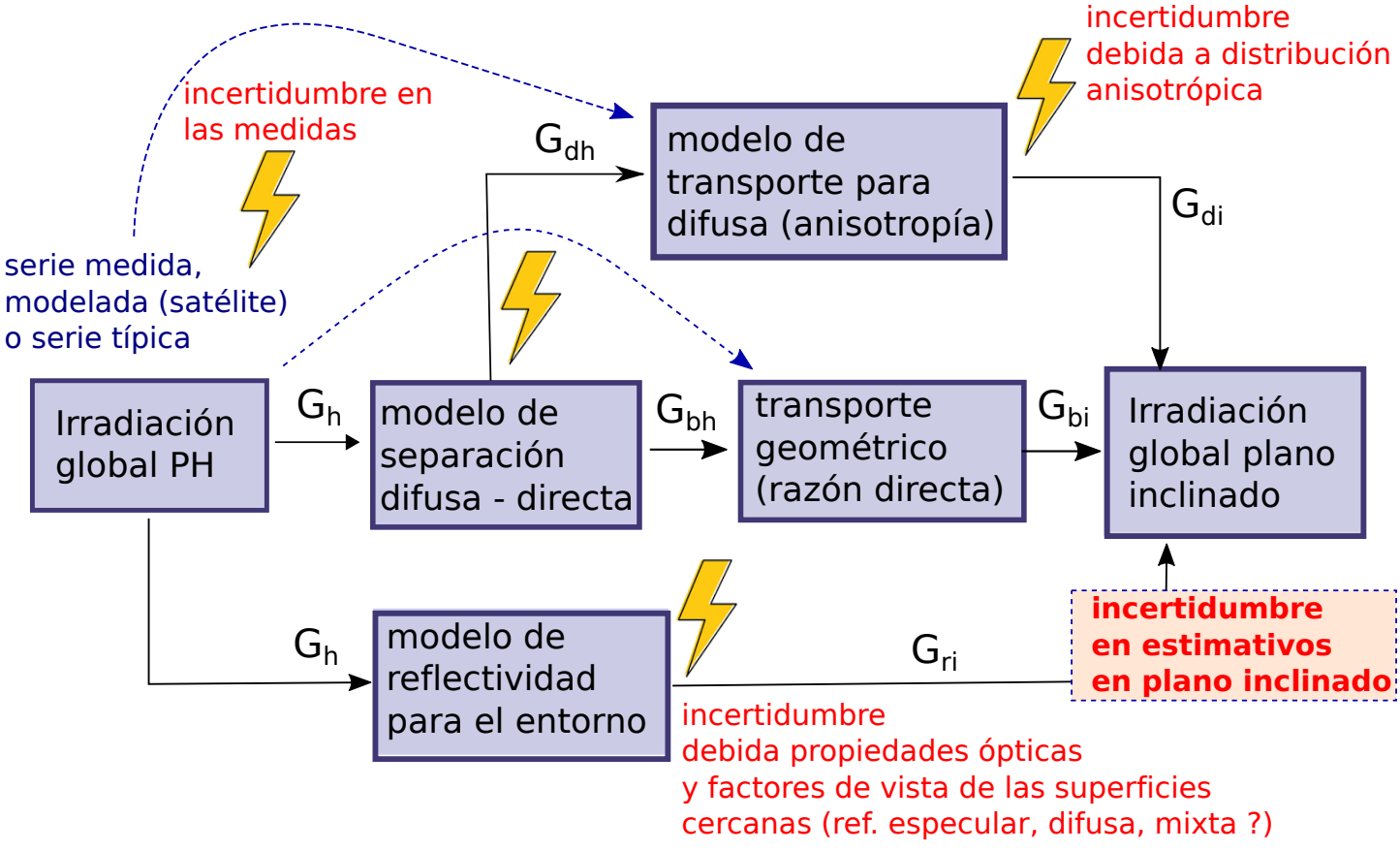
La orientación (azimut) de la superficie puede ser arbitraria, pero el caso de mas interés para la captación de energía es la superficie orientada al ecuador.

# El problema del transporte de irradiación

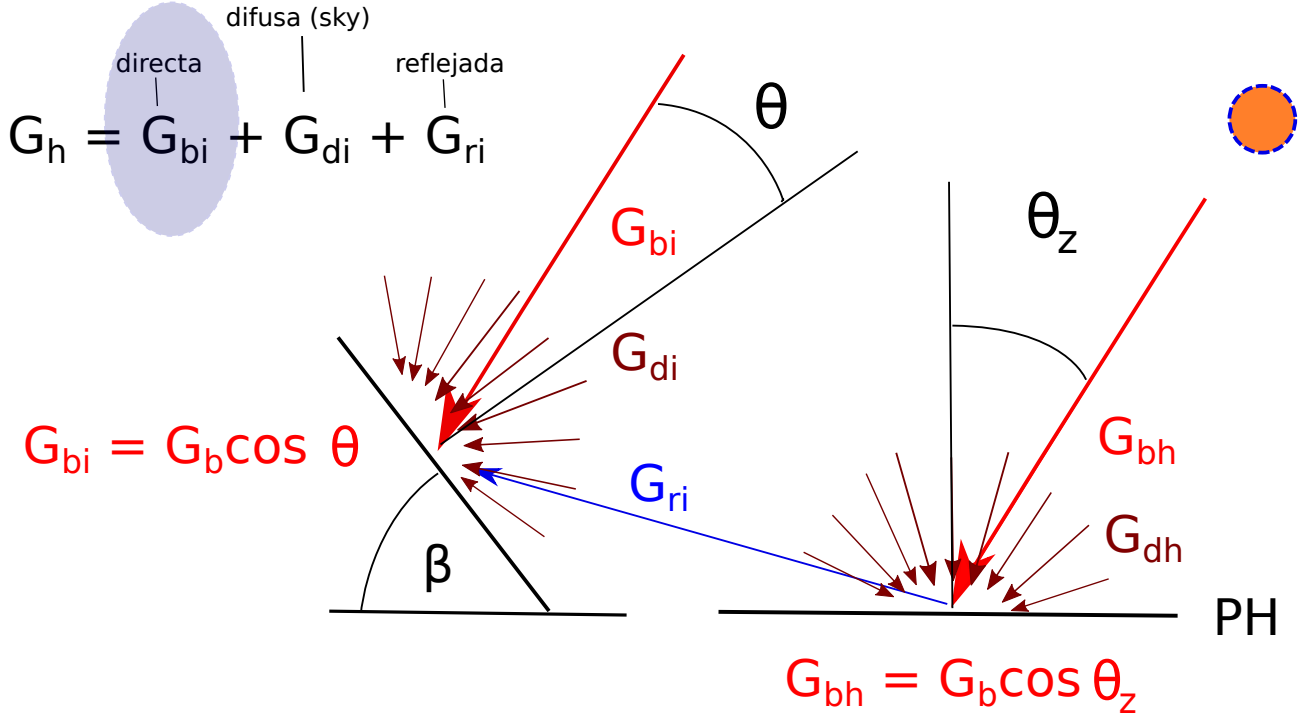


# incertidumbre en el transporte de irradiación

es necesario evaluar localmente el resultado del transporte a plano inclinado



El transporte de irradiancia directa es un problema geométrico



Componente directa en plano inclinado:

$$G_{bi} = G_b \cos\theta = G_{bh} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

Se define la razón directa:

adimensionado, no negativo

$$r_b = \frac{G_{bi}}{G_{bh}} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

$$r_b = 0 \text{ de otro modo}$$

Si $\cos\theta > 0$ y $\cos\theta_z > 0$

Sol sobre la superficie

Sol sobre el horizonte

De modo que: $G_{bi} = r_b\, G_{bh}$

La razón directa de un plano horizontal es 1.
La de un plano inclinado, puede ser mayor o menor que 1.
La razón directa a la salida/puesta del Sol puede diverger...

# De que depende $r_b$ ?

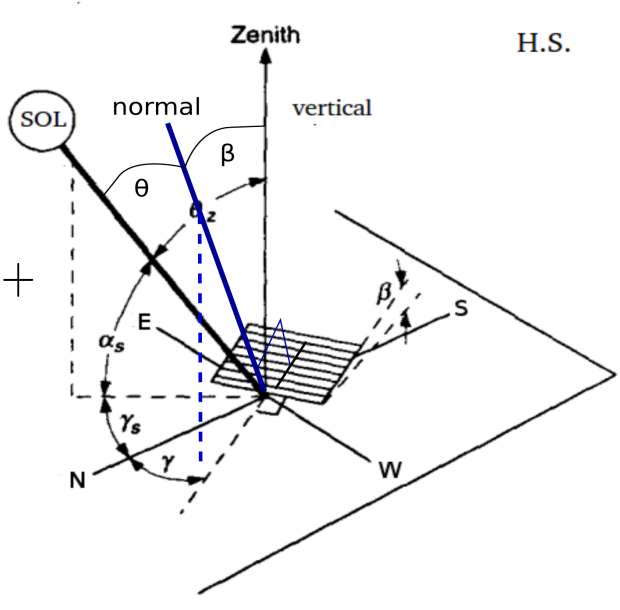
$$r_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

- ubicación del observador (latitud, longitud)
- hora del día
- día del año (ordinal día)

Ademas, depende de la orientación de la superficie (β, γ)

Para superficie de orientación cualquiera:

$$\cos\theta = [\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega]\cos\beta + [(\sin\delta\cos\phi - \cos\delta\sin\phi\cos\omega)\cos\gamma + \cos\delta\sin\omega\sin\gamma]\sin\beta.$$




β=0 : se reduce a la expresión para PH

# Caso mas relevante: superficie orientada al ecuador

$\gamma = 0$ o $\gamma = \pi$ $\quad\quad$ $\sin\gamma = 0$ $\quad\quad$ $s = \cos\gamma = \pm 1$

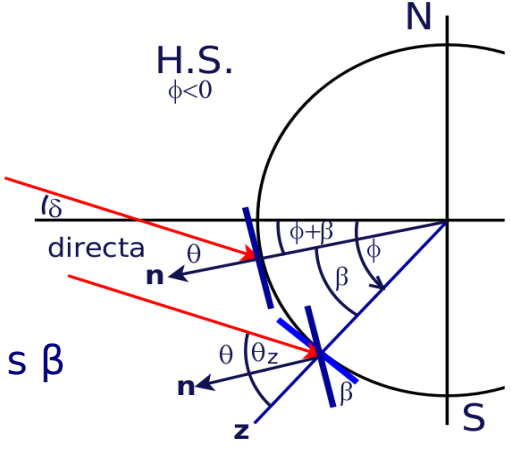
H.S. $\quad$ H.N.

H.S. : s = +1
H.N.: s = -1

$$\cos\theta = [\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega]\cos\beta + s\,[\sin\delta\cos\phi - \cos\delta\sin\phi\cos\omega]\sin\beta.$$

Más fácil: usar **latitud equivalente**

$$\phi' = \phi + s\beta$$




Una superficie inclinada (β) en latitud Φ
es paralela a una horizontal en latitud Φ' = Φ + s β

$$\cos\theta = \cos\phi'\cos\delta\cos\omega + \sin\phi'\sin\delta$$
$$= \cos(\phi + s\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi + s\beta)\sin\delta$$

# Para una superficie orientada al ecuador

razón directa:

$$r_b(\beta) = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} = \frac{\cos(\phi + s\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi + s\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta}$$

o cero si numerador o denominador no son positivos.

H.S.: s = 1
H.N.: s = -1

Componente directa en plano inclinado:

$$G_{bi} = r_b(\beta) \times G_{bh}$$

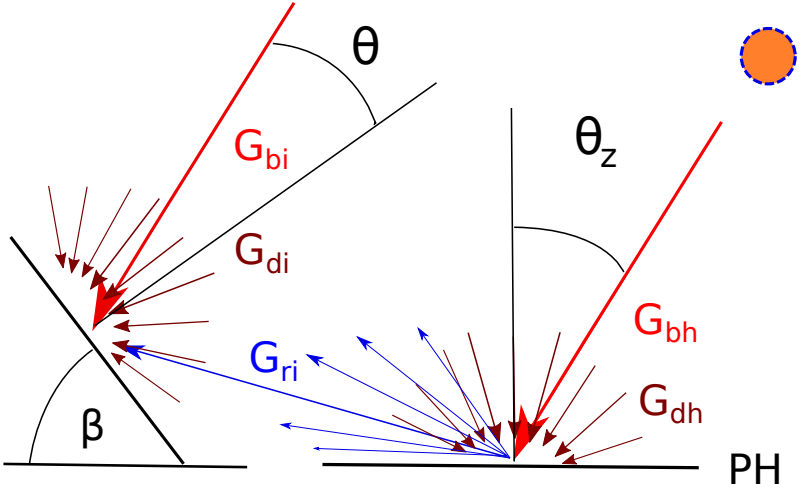
el método de transporte es geométrico.

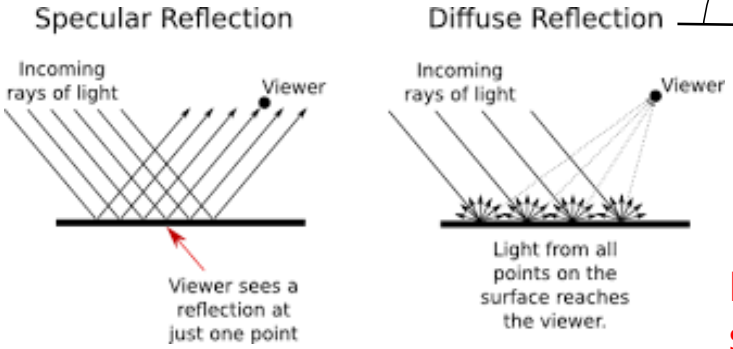
Requiere suposiciones sobre el entorno de la superficie captadora.

$$G_h = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}$$

directa; difusa (sky); reflejada

$$G_{ri} = \rho_g G_h F_{c-g}$$



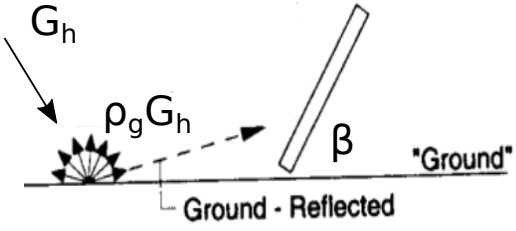

Suponemos: reflección solo del suelo y lo modelamos como un **reflector difuso ideal** con reflectividad $\rho_g$.

Puede ser mas complicado en situaciones reales !

Suponiendo que solo el suelo refleja y es un reflector difuso ideal con reflectividad $\rho_g$

$$G_{ri} = G_h \rho_g F_{c-g}$$

factor de vista colector - suelo



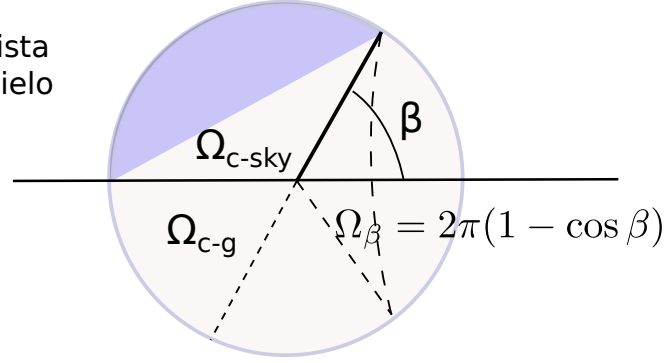

el colector solo ve al cielo o al suelo:

$$F_{c-g} + F_{c-sky} = 1$$

factor de vista colector - cielo

$$F_{c-sky} = \frac{\Omega_{c-sky}}{2\pi} = \frac{1}{2}(1+\cos\beta)$$

$$F_{c-g} = 1 - F_{c-sky} = \frac{1}{2}(1-\cos\beta)$$



$$G_{ri} = \rho_g G_h \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

importa más cuanto mayor es β

| Superfice | $\rho_g$ |
|---|---|
| nieve fresca | 0,75 |
| arena blanca | 0,70 |
| paredes claras (pintura clara, reboque o bloques claros, etc) | 0,60 |
| paredes oscuras (ladrillo o pintura oscura) | 0,27 |
| pedregullo | 0,20 |
| bitumen, asfalto | 0,13 |
| pasto verde | 0,26 |
| pasto seco | 0,20 |
| hojas secas | 0,30 |
| cemento armado antiguo | 0,22 |
| pintura negra | 0,10 |
| plantíos, cultivos maduros | 0,26 |
| caminos de tierra | 0,04 |
| suelo arcilloso | 0,14 |
| superficies de agua (ángulo de incidencia grande) | 0,07 |

reflectividad típica vegetación: ~0.25

$$G_{ri}^{max} = \frac{1}{2}\rho_g\, G_h$$

si β=90°

puede tener una dependencia estacional...

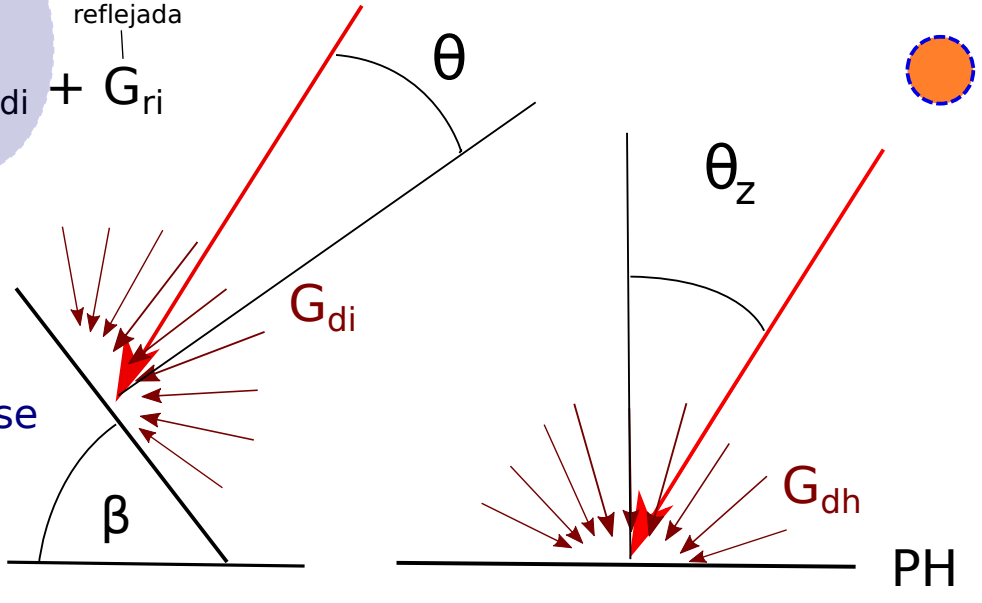
puede haber otras superficies contribuyendo en forma importante...

# Transporte de irradiancia difusa

El transporte de irradiancia directa no es solo un problema geométrico debido a la anisotropía.

$$G_h = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}$$

directa | difusa (sky) | reflejada

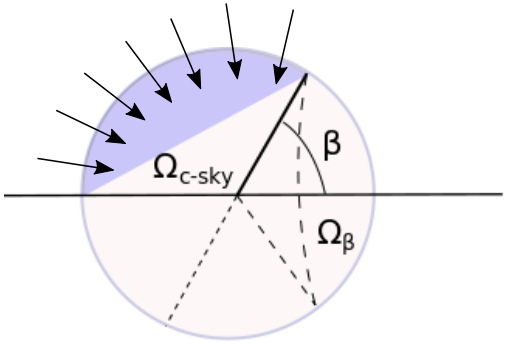



si la irradiancia difusa se distribuyese en forma isotrópica en el cielo...

→ el transporte de plano horizontal a plano inclinado es un problema geométrico.

Si suponemos una distribución isotrópica de la irradiancia difusa en la bóveda celeste, una fracción $F_{c\text{-}sky}$ de la irradiancia difusa horizontal incide en la superficie inclinada.

$$G_{di}^{iso} = F_{c-sky}\, G_{dh} = \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\, G_{dh}$$




de modo que, en el **modelo isotrópico**

$$G_i^{iso} = r_b(\beta) G_{bh} + \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\, G_{dh} + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\, \rho_g\, G_h$$

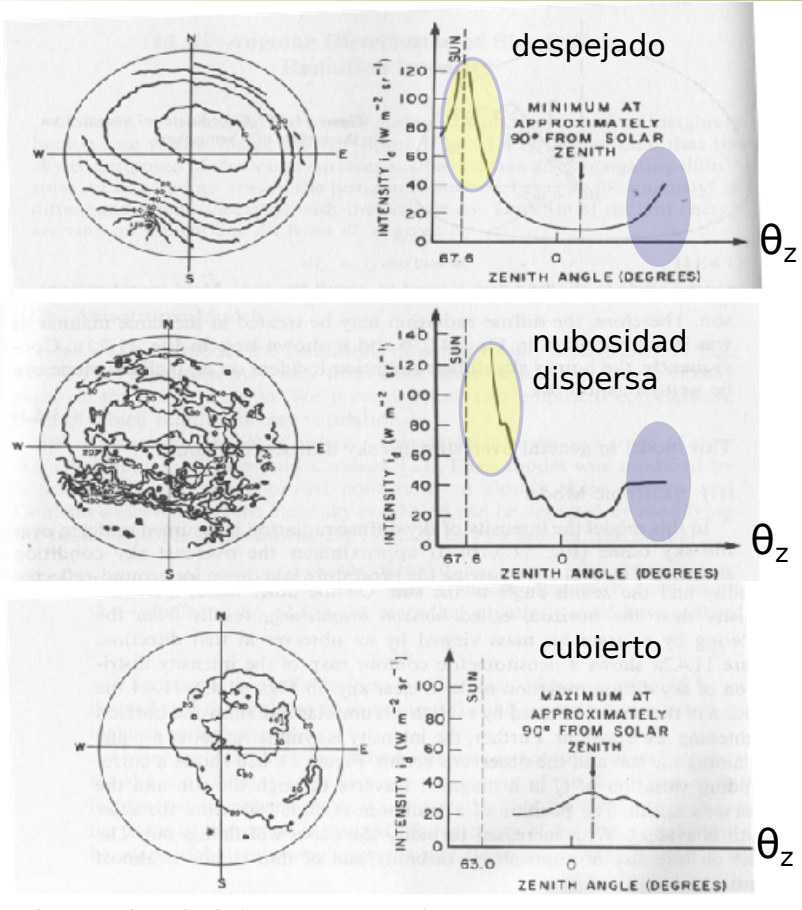
en términos adimensionados $r_i = G_i / G_h$

es necesario separar directa y difusa antes del transporte

$$r_i^{iso} = r_b(\beta)(1-f_d) + \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\, f_d + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\, \rho_g$$

# Anisotropía en la irradiancia difusa

isolíneas de irradiancia




Figuras de Iqbal, (ver Notas FRS)

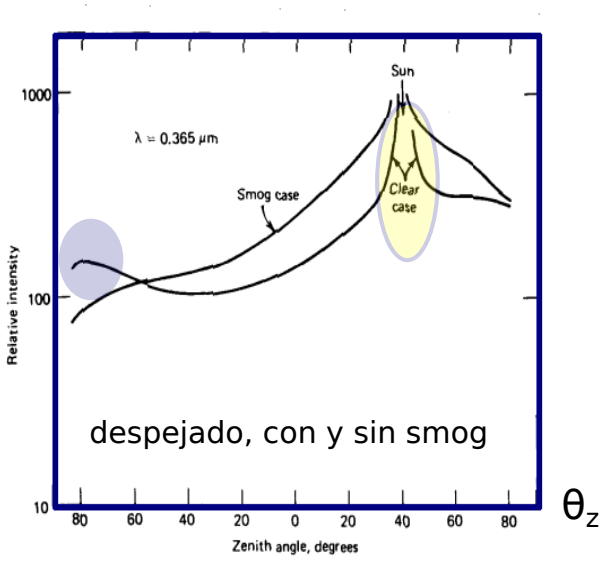



Fig. de Duffie & Beckman ver Notas FRS

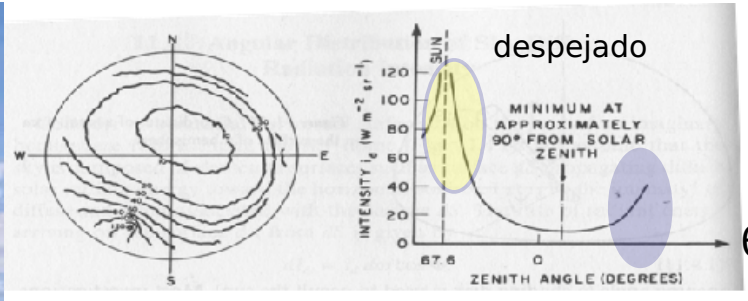
anisotropías principales para cielo no cubierto:

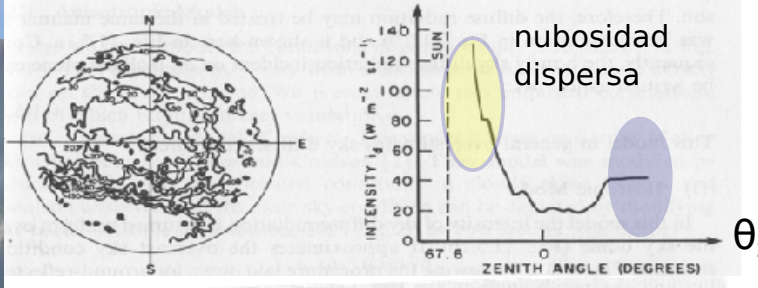
$$G_{di} = G_{di}^{iso} + G_{di}^{cs} + G_{di}^{hz}$$

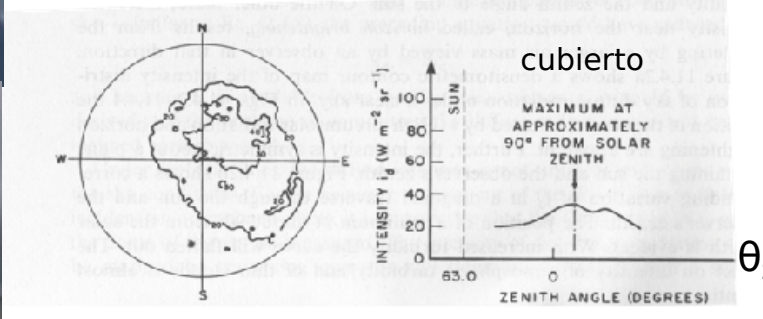
circumsolar

brillo de horizonte

# Anisotropía en la irradiancia difusa - muchas situaciones




Figuras de Iqbal, (ver Notas FRS)

tiene en cuenta la **anisotropía circumsolar**, usando un índice de anisotropicidad $A_i$, igual a la transmitancia directa:

$$A_i = \tau_b = \frac{G_b}{G_s\, F_n} = \frac{G_b h}{G_s\, F_n\, \cos\theta_z}$$

una fracción $A_i$ de la difusa horizontal se considera como circumsolar y se trata como directa, lo cual aumenta algo el estimado en plano inclinado

$$G_{di} = \underbrace{(1-A_i)G_{dh}\frac{1}{2}(1+\cos\beta)}_{\text{isotrópica}} + \underbrace{A_i G_{dh} \times r_b(\beta)}_{\text{circumsolar}} \qquad \underbrace{G_{di}^{hz} \approx 0}_{\text{brillo horizonte}}$$

en condiciones nubladas, $A_i = 0$ , es toda difusa isotrópica.
en condiciones despejadas, $A_i \approx 0.85$ la mayor parte se trata como directa.

$$G_i^{HD} = r_b(\beta)\ (G_{bh} + A_i G_{dh}) + (1-A_i)\frac{1}{2}(1+\cos\beta)\, G_{dh} + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\rho_g\, G_h$$

razón directa

$$r_i^{HD} = r_b(1 - f_d + A_i\, f_d) + (1-A_i)\frac{1}{2}(1+\cos\beta)\, f_d + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\, \rho_g$$

En términos adimensionados, el modelo HD puede expresarse formalmente igual al modelo isotrópico, pero con una fracción difusa modificada

$$r_i^{HD} = r_b(\beta)(1-\tilde{f}_d) + \frac{1}{2}(1+\cos\beta)\,\tilde{f}_d + \frac{1}{2}(1-\cos\beta)\,\rho_g$$

La transmitancia directa (o factor de anisotropía) es

$$A_i = \frac{G_b}{G_s F_n} = \frac{G_{bh}}{G_s F_n \cos\theta_z} = \frac{G_{bh}}{G_h}\frac{G_h}{G_s F_n \cos\theta_z} = (1-f_d)\,k_t$$

definiendo la fracción difusa modificada:

$$\tilde{f}_d = f_d(1-A_i) = f_d(1-k_t+f_d k_t)$$

Usando $\tilde{f}_d \to f_d$ se recupera el modelo isotrópico.

Agrega al modelo HD la **anisotropía de horizonte**, usando un factor f que depende de la fracción difusa: (Klucher y Reindl, ver Notas FRS)

$$G_{di} = (1 - A_i) G_{dh} \frac{1}{2}(1 + \cos\beta) \left[1 + f \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + A_i G_{dh} \times r_b(\beta)$$

isotrópica + brillo horizonte — circumsolar

$$f = \sqrt{1 - f_d}$$

contribución mayor en cielo despejado:

despejado: $f_d \approx 0.15 \rightarrow f \approx 0.92$

cubierto: $f_d = 1 \rightarrow f = 0$

$$G_i^{HDKR} = r_b(\beta)\ (G_{bh} + A_i G_{dh}) + (1 - A_i)\frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\left[1 + f \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] G_{dh} + \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)\rho_g\, G_h$$

razón directa

$$r_i^{HDKR} = r_b(\beta)(1 - \tilde{f}_d) + \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\left[1 + f \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \tilde{f}_d + \frac{1}{2}(1 - \cos\beta)\,\rho_g$$

Dificultad: existen pocos datos confiables de $G_i$, $G_{bh}$ y $G_{dh}$ en Uruguay

Crédito: Inti Piccioli (trabajo en curso, tesis maestría Ing. Energía)

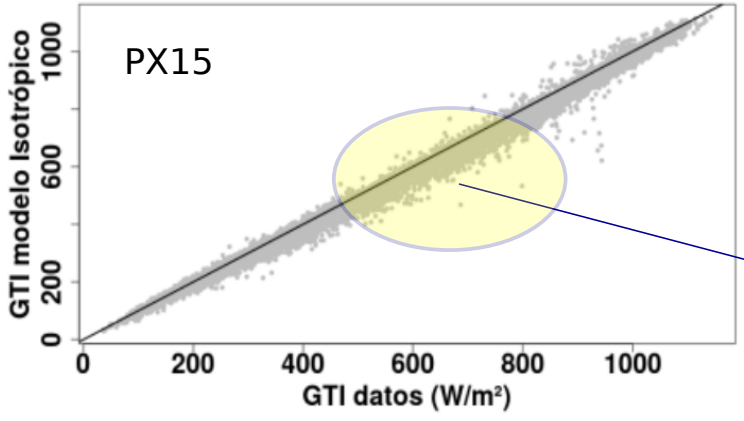
medidas minutales del LES (Salto) años 2015-2016

$G_i$ ($\beta$=30º), $G_h$, $G_b$, $G_{dh}$

PX15 (15 minutos); 10999 datos diurnos $\xrightarrow{\text{filtrado}}$ 8335 datos

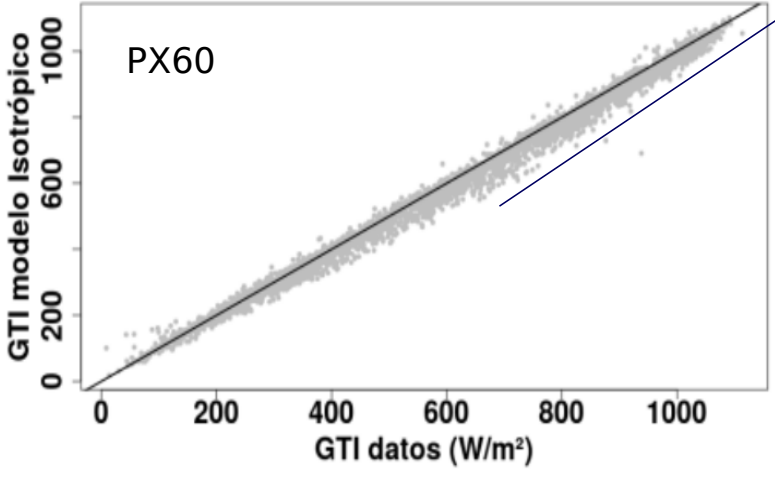
PX60 (60 minutos); 5068 horas diurnas $\xrightarrow{\text{filtrado}}$ 3795 horas

| | 15 minutos % | | 60 minutos % | |
|---|---|---|---|---|
| **modelo** | **rMBD** | **rRMSD** | **rMBD** | **rRMSD** |
| **Isotrópico** | -3.2 | 5.0 | -2.6 | 4.5 |
| **HD** | -1.4 | 3.3 | -1.2 | 2.9 |
| **HDKR** | -1.3 | 3.2 | -1.1 | 2.9 |
| media $I_i$ | 535.1 W/m$^2$ | | 532.4 W/m$^2$ | |




modelo isotrópico

tendencia a la subestimación




| | 15 minutos | | 60 minutos | |
|---|---|---|---|---|
| modelo | rMBD | rRMSD | rMBD | rRMSD |
| Isotrópico | -3.2 | 5.0 | -2.6 | 4.5 |
| HD | -1.4 | 3.3 | -1.2 | 2.9 |
| HDKR | -1.3 | 3.2 | -1.1 | 2.9 |
| media $I_i$ | 535.1 W/m$^2$ | | 532.4 W/m$^2$ | |

Algunas conclusiones preliminares:

- **Incertidumbre característica:** entre 3 y 5 % de la media de la medida. Es del orden de la incertidumbre en la medida en PH. El transporte no introduce mucha incertidumbre, si se conoce la separación directa-difusa.

- Todos los modelos considerados **subestiman** la irradiación en plano inclinado con sesgos negativos entre -3% (isotrópico) y -1% (HDKR).

- Si no se conoce la separación directa-difusa y se usa un modelo de separación la incertidumbre introducida afecta menos al **modelo isotrópico** que es mas robusto y pasa a tener un desempeño algo mejor que el de modelos mas sofisticados: rMBD = -0.3% y rRMSD = 3.6 %.

Trabajo en curso.
Faltan incluir mas conjuntos de datos, otros modelos y escalas temporales.

# Fin de la Parte 1 de la Unidad 4