

# Radiación Solar

## Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① Introducción

② Geometría Sol y Tierra

③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre

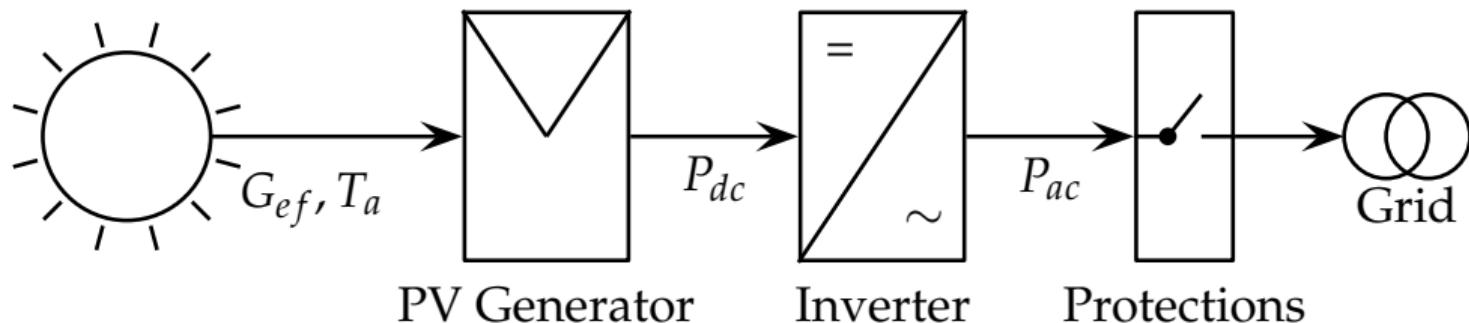
④ Cálculo de componentes de radiación solar

⑤ Bases de Datos

⑥ Radiación Solar en Generadores FV

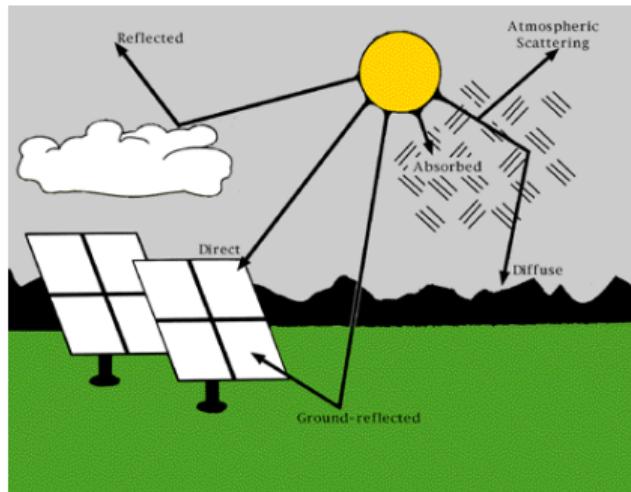
# Radiación Solar y Sistemas Fotovoltaicos

- ▶ La **energía producida** por un sistema fotovoltaico depende principalmente de la **radiación incidente** en el generador.
- ▶ Consecuentemente, la **estimación del comportamiento** de un sistema FV en un determinado lugar durante un período temporal exige **conocer la radiación solar disponible en el plano del generador**.



# La radiación solar no se puede calcular analíticamente

- ▶ La radiación solar que alcanza la superficie terrestre es el resultado de complejas interacciones en la atmósfera.
- ▶ Para estimar la radiación se necesitan medidas terrestres o imágenes de satélite.



# Ángulo de Inclinación

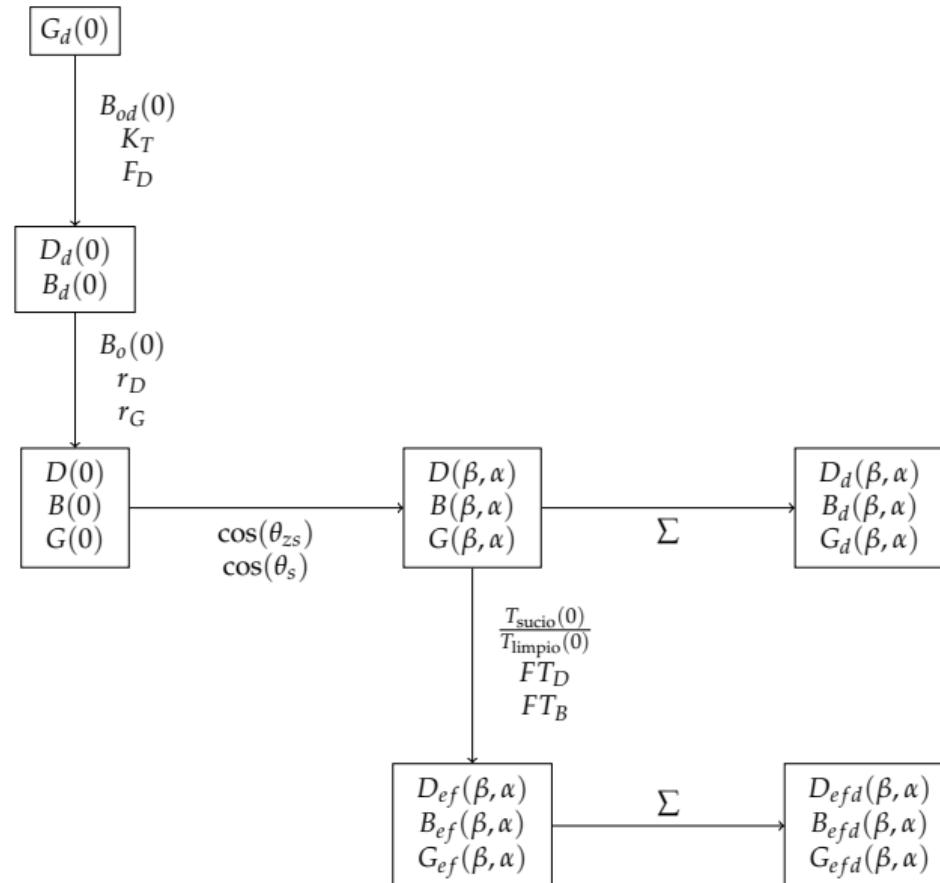
- ▶ Los generadores FV tienen un **ángulo de inclinación positivo** para maximizar el rendimiento.
- ▶ Este ángulo depende de la **latitud** del lugar y de la **aplicación del sistema**.



## Bases de Datos de Radiación Solar

- ▶ Por tanto, es inviable mantener una base de datos de radiación solar **incidente**.
- ▶ Las **bases de datos** registran radiación en el **plano horizontal**.
- ▶ La estimación de la radiación incidente en el plano inclinado requiere un **procedimiento de transposición**.

# Del plano horizontal al plano inclinado



① Introducción

② Geometría Sol y Tierra

③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre

④ Cálculo de componentes de radiación solar

⑤ Bases de Datos

⑥ Radiación Solar en Generadores FV

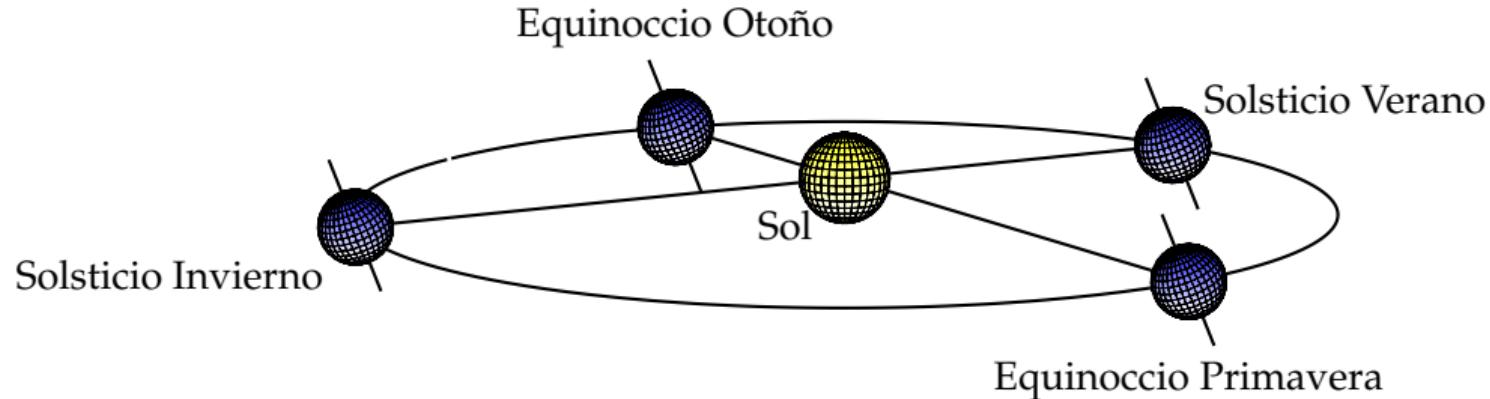
## ② Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

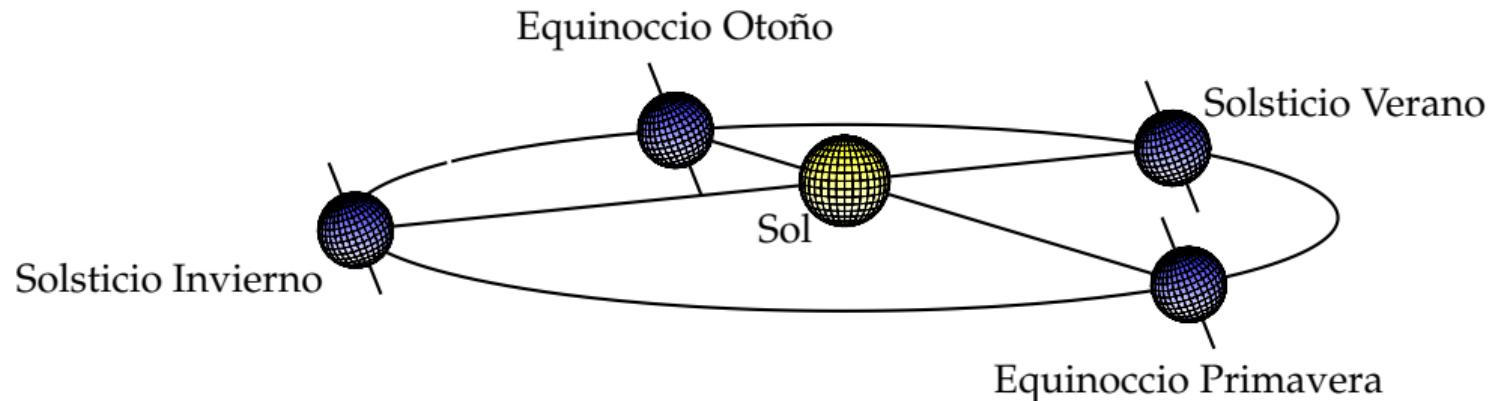
Hora solar y oficial

# Movimiento terrestre



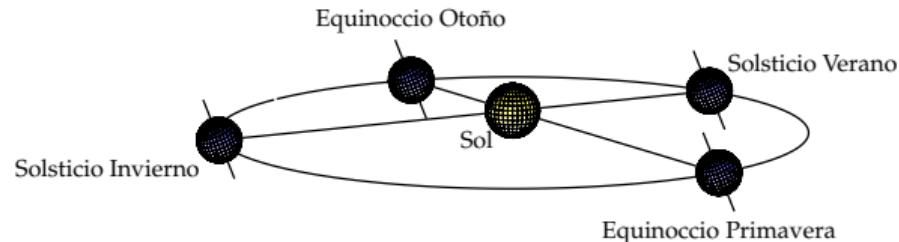
- ▶ La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - ▶ Periodo aproximado: 24 horas.

# Movimiento terrestre

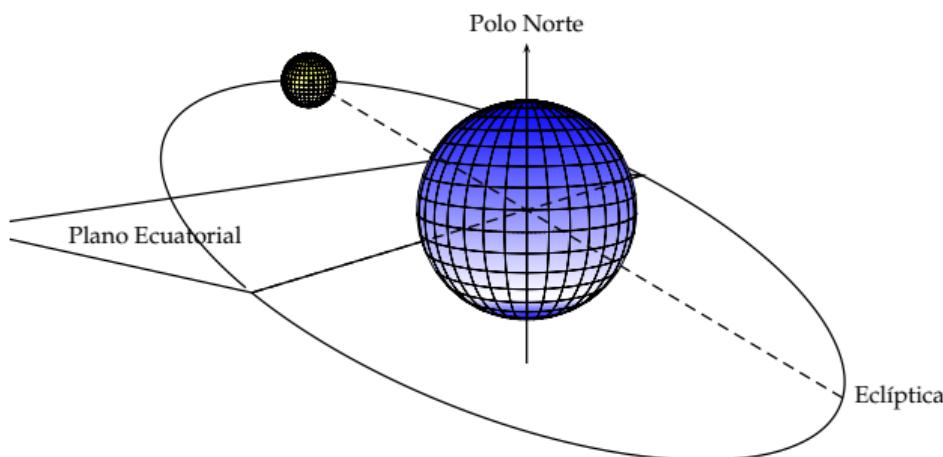


- ▶ La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
  - ▶ Período aproximado: 24 horas.
- ▶ La Tierra se mueve **alrededor del Sol** siguiendo una elipse de baja excentricidad.
  - ▶ Período aproximado: 1 año.
  - ▶ Este movimiento está contenido en el llamado *plano de la eclíptica*

# Movimiento terrestre



Entre eje polar y plano de la eclíptica: ángulo constante de  $23,45^\circ$ .



Entre plano ecuatorial y línea que une Tierra y Sol: ángulo variable, *declinación*.

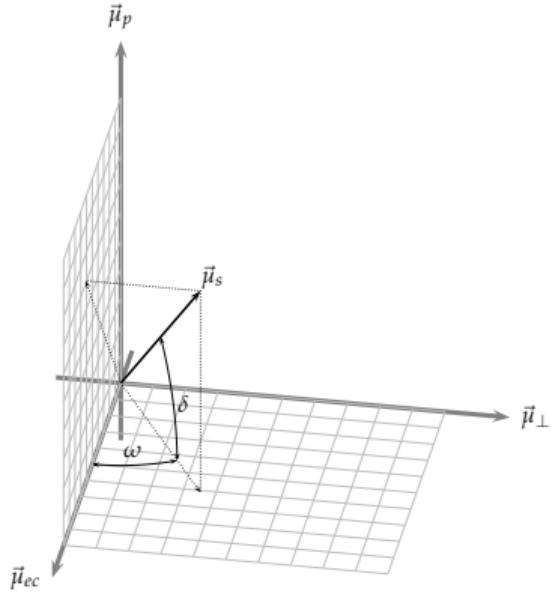
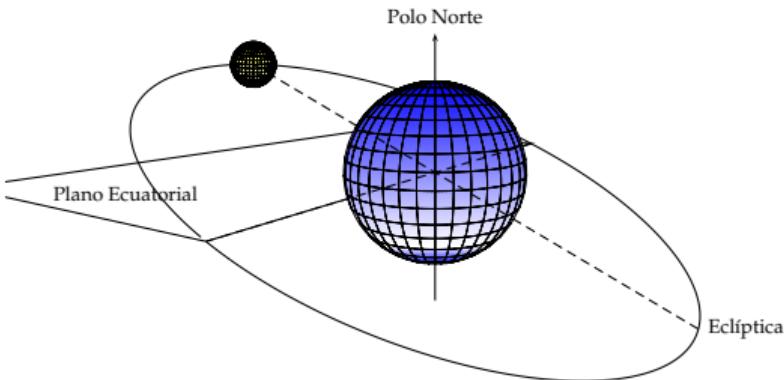
## ② Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

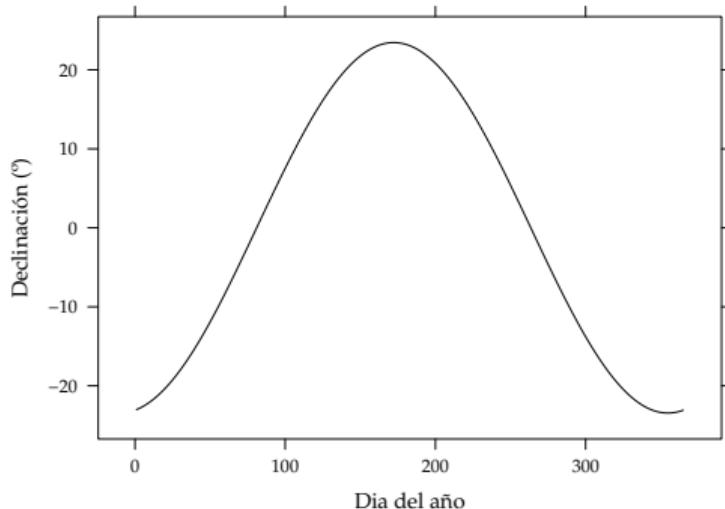
Hora solar y oficial

# Ejes terrestres



- **Declinación**,  $\delta$ : ángulo entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol.
- **Hora Solar**,  $w$ : diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ( $w = 0$ ).

# Declinación



## Ecuación de Cooper

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cdot (d_n + 284)}{365} \right)$$

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anochece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anocchece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

## ► Solsticio de diciembre

- ▶ 21-22 Diciembre,  $d_n = 355 - 356$
- ▶ Declinación mínima.
- ▶ Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
- ▶ El Sol amanece por el Sureste y anocchece por el Suroeste en el hemisferio Norte.

# Estaciones

## ► Solsticio de junio

- ▶ 21-22 Junio,  $d_n = 172 - 173$
- ▶ Declinación máxima.
- ▶ Días más largos en hemisferio Norte (verano)
- ▶ El Sol amanece por el Noreste y anocchece por el Noroeste en el hemisferio Norte.

## ► Solsticio de diciembre

- ▶ 21-22 Diciembre,  $d_n = 355 - 356$
- ▶ Declinación mínima.
- ▶ Días más cortos en hemisferio Norte (invierno)
- ▶ El Sol amanece por el Sureste y anocchece por el Suroeste en el hemisferio Norte.

## ► Equinoccios

- ▶ 21-22 Marzo ( $d_n = 80 - 81$ )
- ▶ 22-23 Septiembre ( $d_n = 265 - 266$ )
- ▶ Declinación nula
- ▶ La duración de noche y día coinciden.
- ▶ El Sol amanece por el Este y anocchece por el Oeste.

# Hora Solar

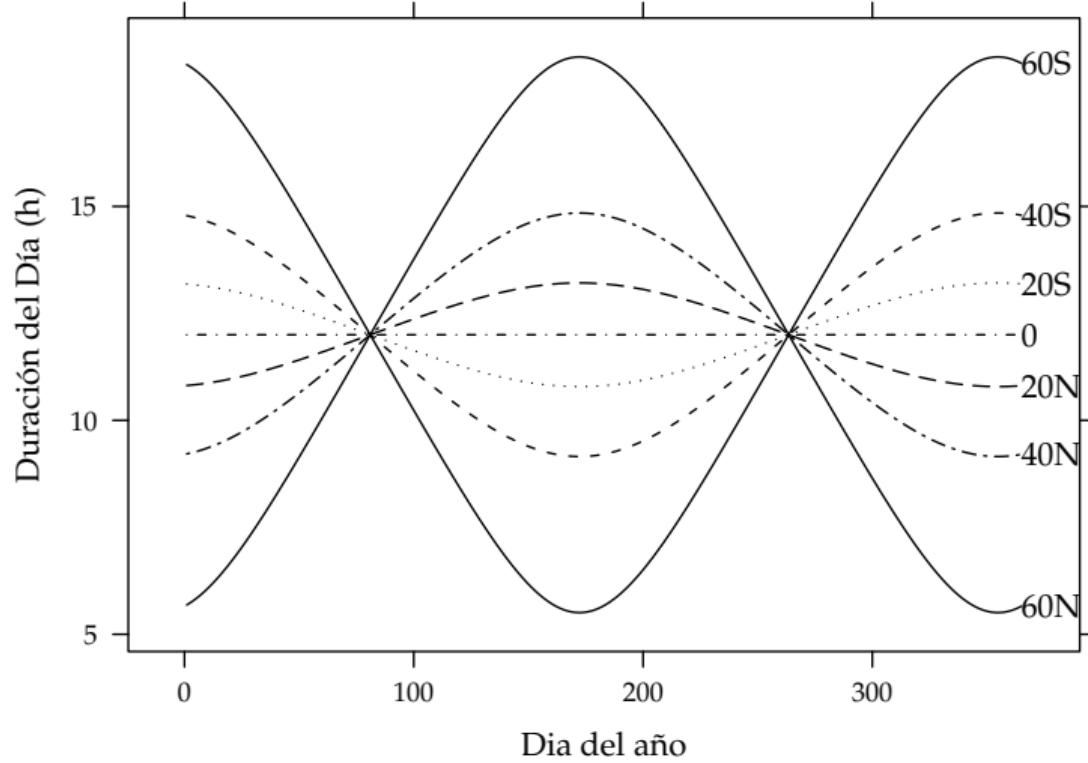
- ▶  $w$ , diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ( $w = 0, \psi_s = 0$ ).
- ▶ Criterio de signos:  $w < 0$  antes del mediodía.
- ▶  $1\text{h} = 15^\circ$  ( $24\text{h} = 2\pi$  radians  $= 360^\circ$ )
- ▶ (Horas)  $-12, -11, -10, \dots, -1, \mathbf{0}, 1, \dots, 10, 11, 12$

Amanecer ( $\gamma_s = 0$ )

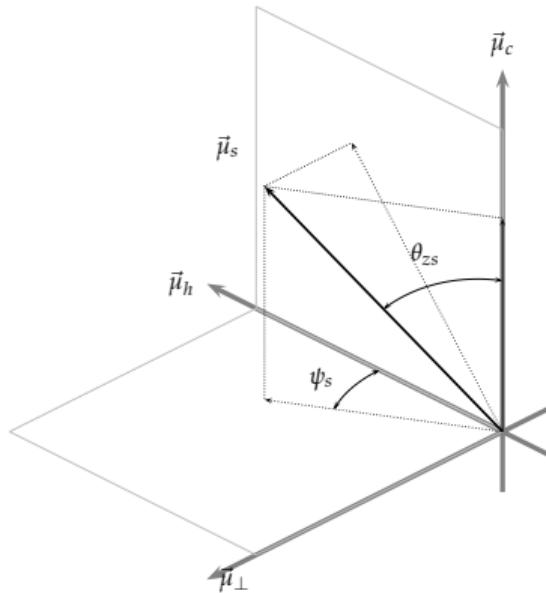
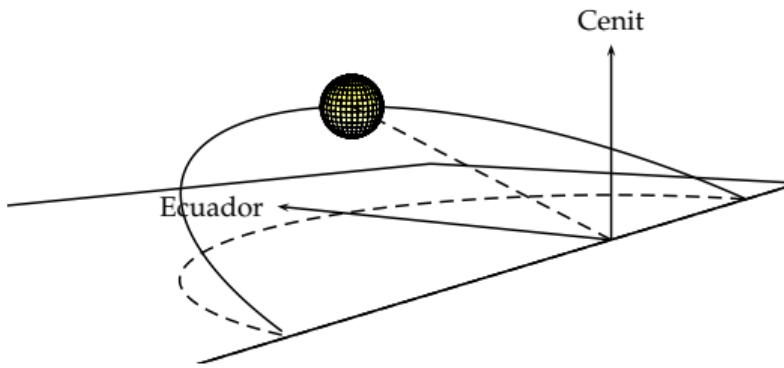
$$\cos(\omega_s) = -\tan(\delta) \tan(\phi)$$

La longitud del día,  $|2 \cdot \omega_s|$ , depende de  $\phi$  y  $d_n$ .

# Duración del día

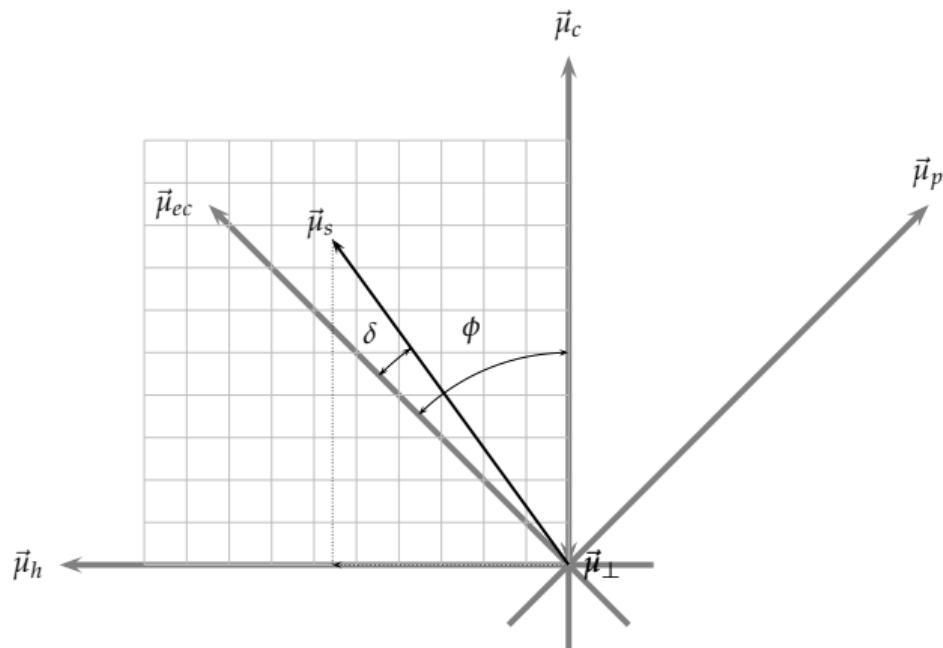


# Ejes locales



- **Cenit Solar**,  $\theta_{zs}$ : ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- **Azimut Solar**,  $\psi_s$ : ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- Dependen de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .

# Relación entre sistemas de coordenadas

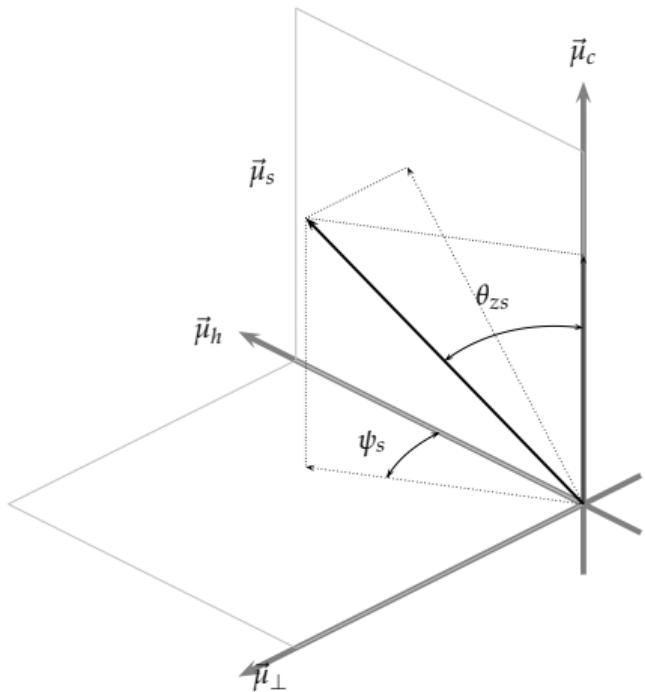


- **Latitud ( $\phi$ ) con signo:** Positivo para Hemisferio Norte, Negativo para Hemisferio Sur.

# Cenit Solar

$$\cos(\theta_{zs}) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi) + \sin(\delta) \sin(\phi)$$

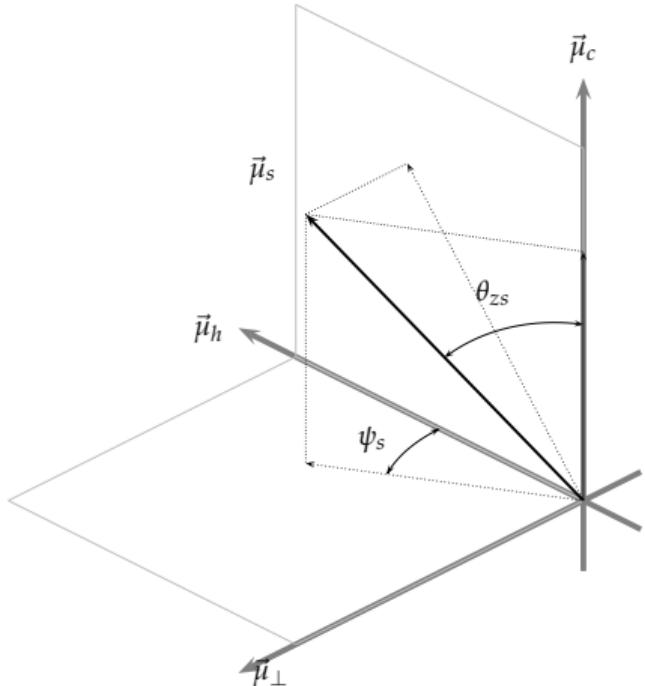
- ▶  $\theta_{zs}$ : **ángulo cenital**, ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- ▶  $\gamma_s$ , **ángulo altura solar**, ángulo complementario de  $\theta_{zs}$ .
- ▶ Dependen de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .



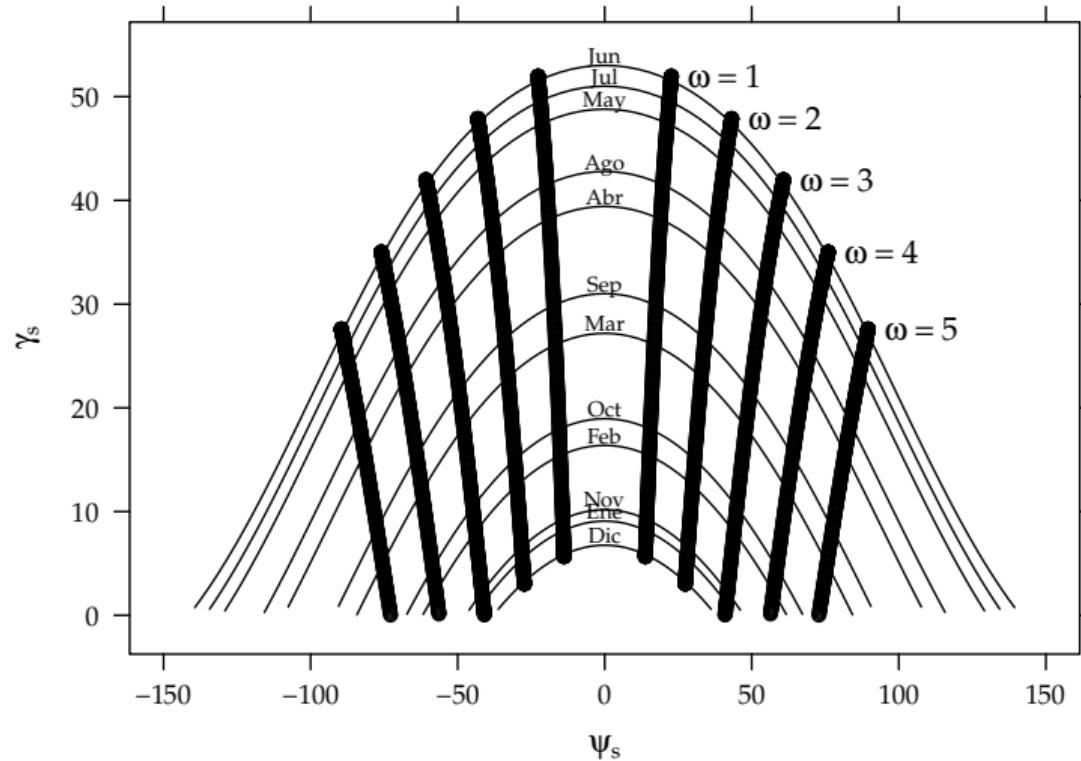
# Azimut solar

$$\cos(\psi_s) = \text{sign}(\phi) \cdot \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\phi) - \cos(\phi) \sin(\delta)}{\sin(\theta_z)}$$

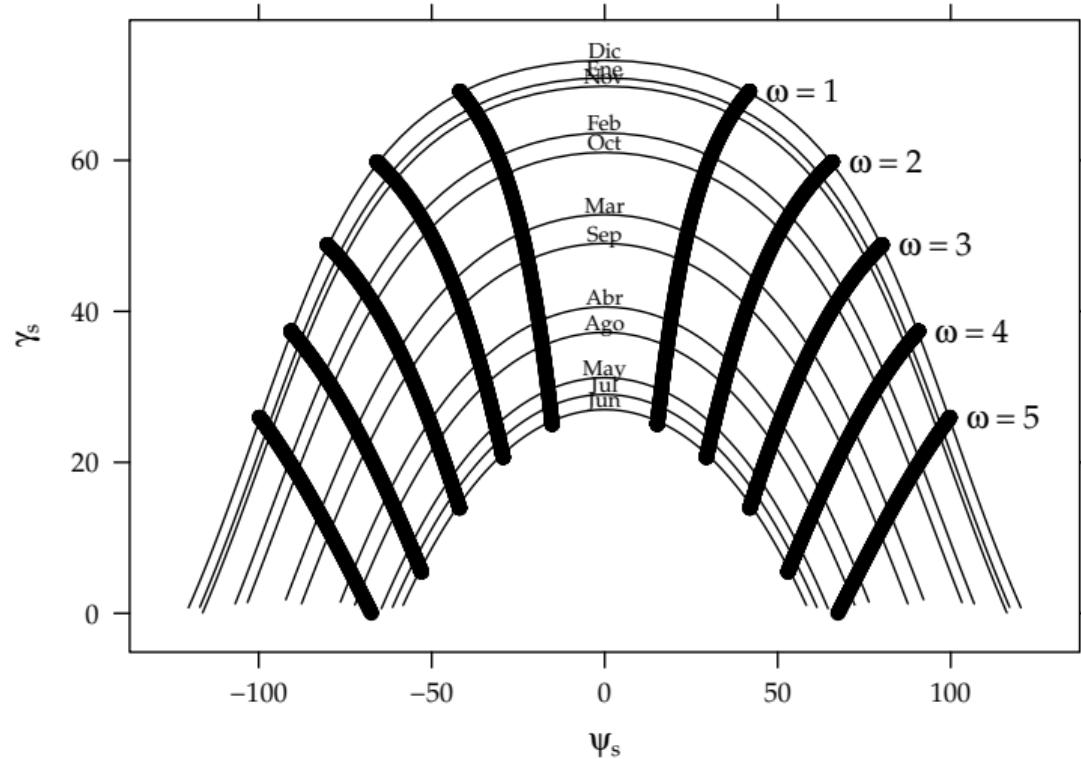
- ▶  $\psi_s$ : **azimut solar**, ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- ▶ Depende de  $d_n$ ,  $\omega$ , y  $\phi$ .
- ▶ Criterio de Signos: negativo antes del mediodía.



# Trayectoria Solar ( $60^{\circ}N$ )



# Trayectoria Solar ( $40^{\circ}S$ )



## ② Geometría Sol y Tierra

Movimiento Sol-Tierra

Ángulos Solares

Hora solar y oficial

## Hora solar

$$\omega = 15 \cdot (TO - AO - 12) + \Delta\lambda + \frac{EoT}{4}$$

- ▶  $\omega$ : hora solar real o aparente [°]
- ▶  $TO$ : hora oficial [h]
- ▶  $AO$ : adelanto oficial por horario de verano [h]
- ▶  $\Delta\lambda$ : corrección por huso horario [°]
- ▶  $EoT$ : Ecuación del tiempo (dia solar real y dia solar medio) [min]

## Hora oficial

- ▶ **La hora oficial** es una medida del tiempo **ligada a un meridiano** que sirve de referencia para una zona determinada.
- ▶ La hora oficial de la **España peninsular** se rige por el **huso horario de Centroeuropa**. Este huso horario está situado en  $15^{\circ}\text{E}$ .
- ▶ **Longitudes positivas al este del meridiano de Greenwich.**
- ▶ **Corrección:**  $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$ , con  $\lambda_L$  la longitud local y  $\lambda_H$  la longitud del huso horario.  $\Delta\lambda$  es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.

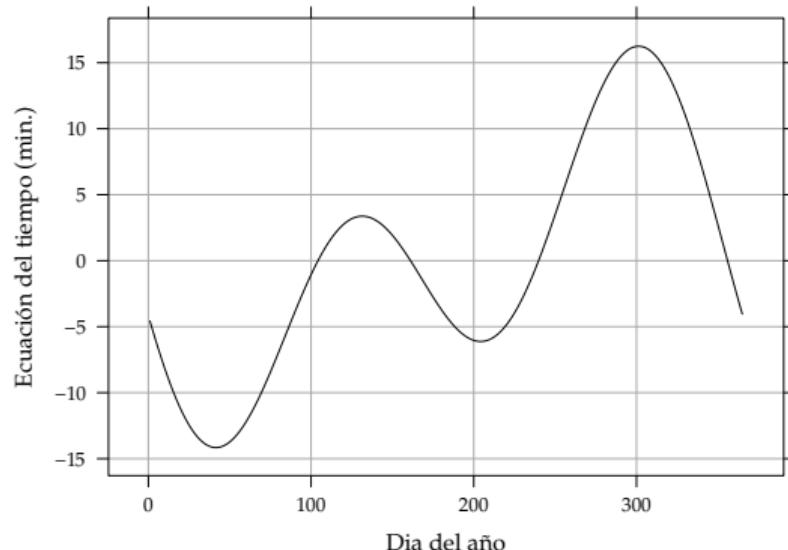
# Tiempo solar medio

- ▶ **La duración del día solar real**, definido como el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano local, **varía a lo largo del año**.
- ▶ El promedio anual de esta variación es nulo: *día solar medio*, cuya duración es constante a lo largo del año e igual al valor medio de la duración del día solar real.

# Ecuación del Tiempo

$$\text{EoT} = 229.18 \cdot (-0.0334 \cdot \sin(M) + 0.04184 \cdot \sin(2 \cdot M + 3.5884))$$

$$M = \frac{2\pi}{365.24} \cdot d_n$$



## Ejemplo de cálculo

Calcula la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 a las 12 de la mañana, hora oficial de la ciudad de A Coruña, Galicia. Esta localidad está contenida en el meridiano de longitud  $8.38^{\circ}\text{W}$  y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.

- ① Introducción
- ② Geometría Sol y Tierra
- ③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- ④ Cálculo de componentes de radiación solar
- ⑤ Bases de Datos
- ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

### ③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre

Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre

# Irradiancia e Irradiación

Irradiancia es la densidad de *potencia* de radiación solar incidente en una superficie.

- Unidades:  $\text{W m}^{-2}$ ,  $\text{kW m}^{-2}$

Irradiación es la densidad de *energía* de radiación solar incidente en una superficie.

- Unidades:  $\text{Wh m}^{-2}$ ,  $\text{kWh m}^{-2}$

## Definición

- ▶ **Radiación extra-atmosférica:** radiación directa del Sol que alcanza la superficie de la atmósfera.
- ▶ **Constante solar**  $B_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$  (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en el límite superior de la atmósfera terrestre)

# Ecuaciones

- ▶ **Irradiancia extra-atmosférica** ( $\text{W m}^{-2}$ )

$$B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_{zs}$$

- ▶ Factor de corrección por excentricidad

$$\epsilon_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos(2\pi d_n / 365)$$

- ▶ **Irradiación extra-atmosférica diaria** ( $\text{Wh m}^{-2}$ )

$$B_{0d}(0) = -\frac{24}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$$

( $\omega_s$  en radianes)

## Días promedio

- ▶ Es posible demostrar que el **promedio mensual** de esta irradiación diaria **coincide numericamente** con el valor de irradiación diaria correspondiente a los denominados **días promedios**, días en los que la declinación correspondiente coincide con el promedio mensual
- ▶ Por tanto, podemos calcular el valor medio mensual de la irradiación diaria extra-atmosférica con el valor de la declinación de uno de los doce días promedio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
$d_n$	17	45	74	105	135	161

Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$d_n$	199	230	261	292	322	347

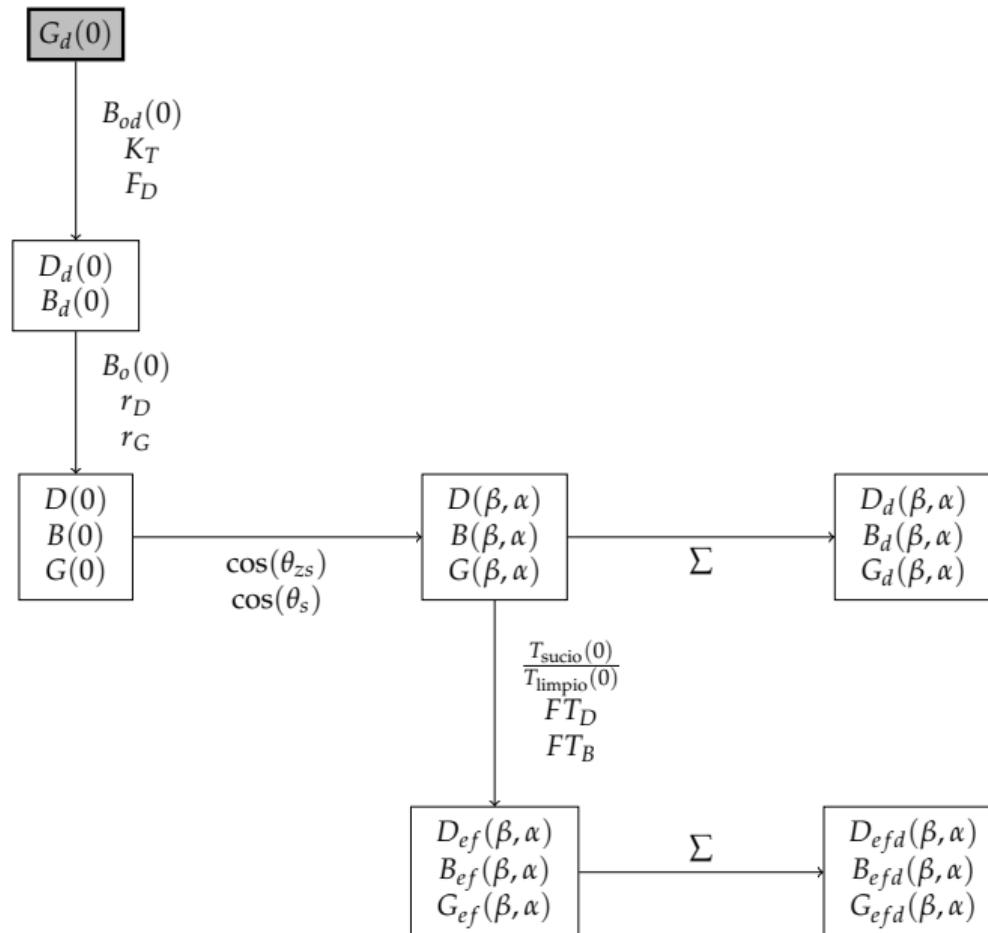
## Ejemplo de cálculo

Calcula la irradiación diaria extra-atmosférica en el plano horizontal del día 18 de septiembre ( $d_n = 261$ ) en un lugar de latitud  $40^{\circ}\text{N}$ .

### ③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre

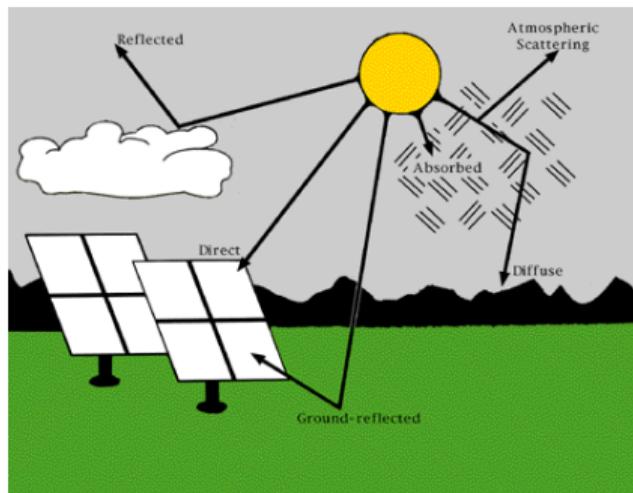
Radiación Extra-atmosférica

Radiación solar en la superficie terrestre



# Interacción de la radiación con la atmósfera

- **Disminución** de la radiación incidente en la superficie terrestre (reflexión en nubes)
- **Modificación de las características espectrales** de la radiación (absorción por vapor de agua, ozono y CO<sub>2</sub>)
- **Modificación de la distribución espacial** (dispersión por partículas)



# Componentes de la radiación solar

- ▶ **Radiación Directa.** (B)
  - ▶ Línea recta con el Sol.
- ▶ **Radiación Difusa.** (D)
  - ▶ Procedente de todo el cielo salvo el Sol
  - ▶ Rayos dispersados por la atmósfera.
  - ▶ Anisotrópica, proceso estocástico.
- ▶ **Radiación del albedo.** (R, AL)
  - ▶ Procedente del suelo (reflejada)
- ▶ **Radiación Global:**  $G = B + D + R$

# Cómo se escribe

## Forma, tiempo, lugar

**Forma+Tiempo+Lugar:** Irradiación directa (forma) horaria (tiempo) en el plano del generador (lugar)

**Promedios:** Media mensual (periodo) de la irradiación global (forma) diaria (tiempo)

**Lugar:** (Orientación, Inclinación)  
(0=Horizontal)  
(n=Normal)  
(I=Plano del generador)

# Cómo se escribe

Forma, tiempo, lugar

$$Forma_{tiempo,promedio}(lugar)$$

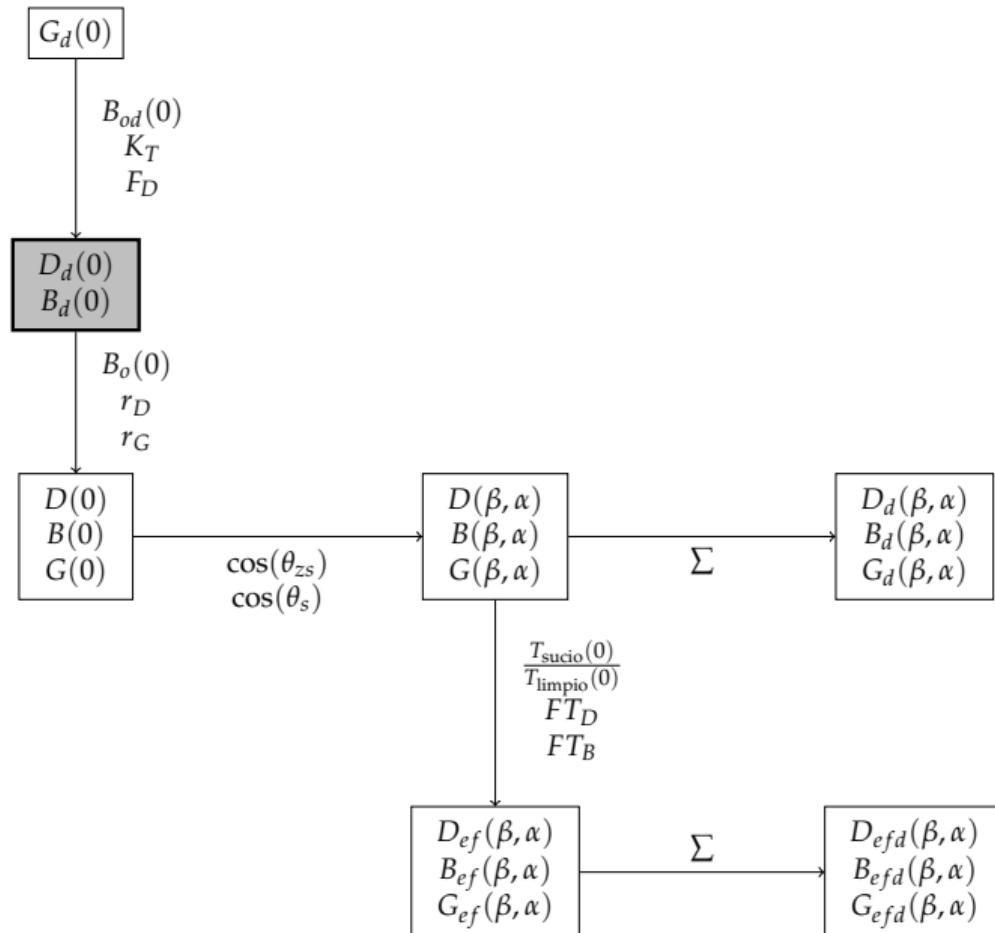
$$G_{d,m}(0)$$

$$D_h(\alpha, \beta)$$

$$B_{0d}(n)$$

$$B(\beta)$$

- 1** Introducción
- 2** Geometría Sol y Tierra
- 3** Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 4** Cálculo de componentes de radiación solar
- 5** Bases de Datos
- 6** Radiación Solar en Generadores FV



# Caracterización de la atmósfera

- ▶ **Masa de aire:**
  - ▶ Relación entre camino recorrido por rayos directos del Sol a través de la atmósfera hasta la superficie receptora y el que recorrerían en caso de incidencia vertical ( $AM=1$ )

$$AM \simeq 1 / \cos \theta_{zs}$$

- ▶ **Índice de claridad**
  - ▶ Relación entre la radiación en la superficie terrestre y la radiación extra-atmosférica, ambas en el plano horizontal
  - ▶ El índice de claridad **no depende de las variaciones debidas al movimiento aparente del sol.**

$$K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)}$$

# Índice de claridad

$K_T$ : índice de claridad instantáneo.  $K_T = G/B_0$

$K_{Td}$ : índice de claridad diario.  $K_{Td} = G_d/B_{0d}$

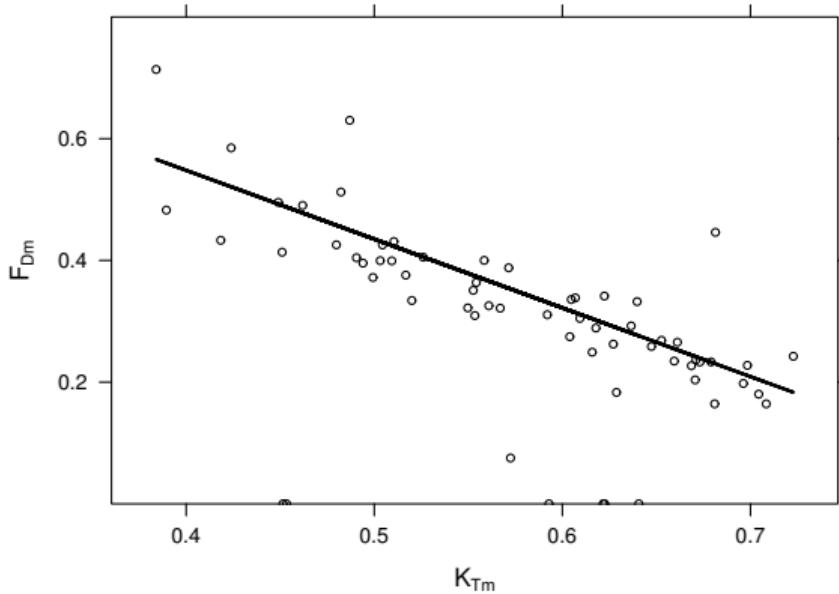
$K_{Tm}$ : índice de claridad mensual.  $K_{Tm} = G_m/B_{0m} = G_{d,m}/B_{0d,m}$

$K_{Ta}$ : índice de claridad anual.  $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \dots$

## Estimación de Directa y Difusa

- ▶ Objetivo: Establecer una **relación entre la fracción difusa** de la radiación horizontal ( $F_D = \frac{D(0)}{G(0)}$ ) y **el índice de claridad**.
- ▶ **Correlación negativa** (a mayor índice de claridad, menor componente difusa)
- ▶ **Correlación independiente de la latitud** (validez quasi-universal)

## Medias mensuales: Ecuación de Page

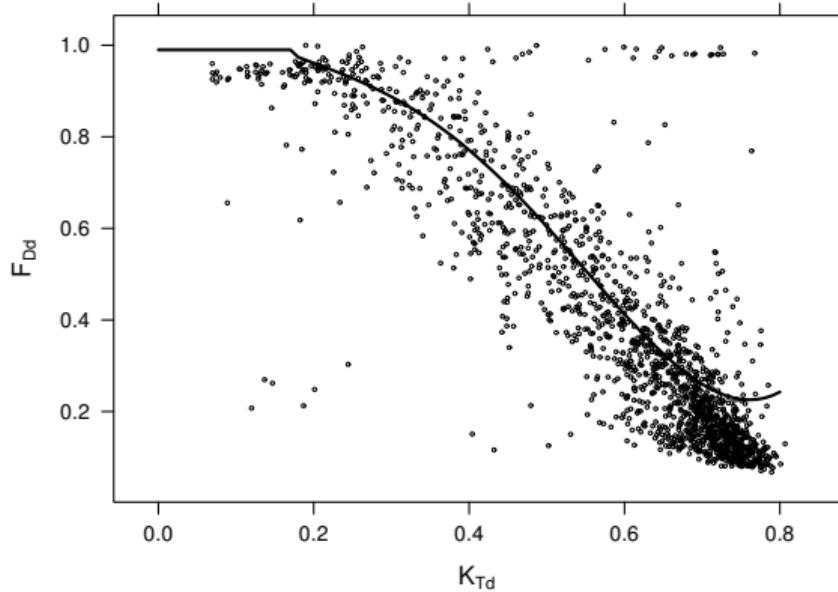


$$F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot K_{Tm}$$

## Ejemplo de cálculo

Calcula las medias mensuales de las componentes de la irradiación en un lugar de latitud 40°N, cuya media mensual de irradiación global en el plano horizontal en el mes de septiembre es de  $G_{d,m}(0) = 4150 \text{ Wh m}^{-2}$ .

# Valores Diarios: Collares-Pereira y Rabl



$$F_{Dd} = \begin{cases} 0.99 & K_{Td} \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 \cdot K_{Td} + 9.473 \cdot K_{Td}^2 - 21.856 \cdot K_{Td}^3 + 14.648 \cdot K_{Td}^4 & K_{Td} > 0.17 \end{cases}$$

## Ejemplo de cálculo

Calcula las componentes directa y difusa de la radiación solar del 17 de Septiembre (día 261) en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con irradiación global diaria horizontal  $G_d(0) = 4510 \text{ Wh m}^{-2}$ .

① Introducción

② Geometría Sol y Tierra

③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre

④ Cálculo de componentes de radiación solar

⑤ Bases de Datos

⑥ Radiación Solar en Generadores FV

## ⑤ Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

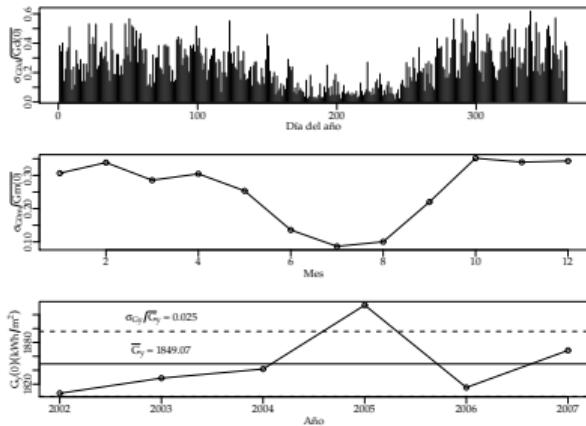
# Variabilidad Solar

- ▶ La **radiación extra-atmosférica** se puede expresar de forma **analítica** en función del día, hora y latitud.
- ▶ La **radiación en la superficie terrestre** es un **proceso estocástico** (aleatorio) debido a la interacción con la atmósfera.
  - ▶ Variabilidad Temporal
  - ▶ Variabilidad Espacial

# Estimaciones a Largo Plazo

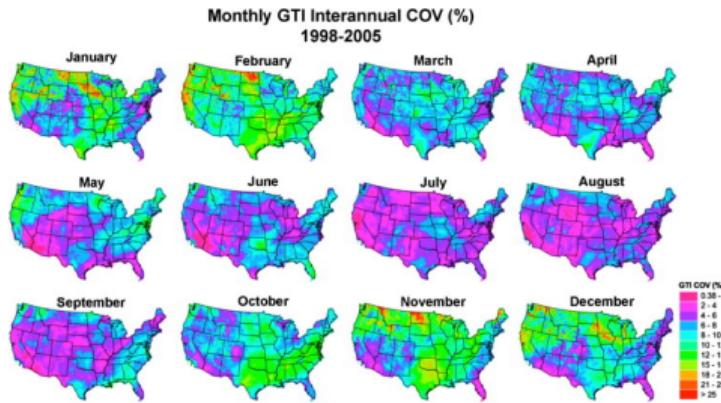
- ▶ Nos interesan **estimaciones a largo plazo** del funcionamiento de los sistemas FV en una localización concreta.
- ▶ Las fuentes de datos de radiación solar deben:
  - ▶ **capturar el comportamiento a largo plazo** (variabilidad interanual)
  - ▶ y ser **representativas de la localización** (variabilidad espacial).

# Variabilidad Temporal



- ▶ La variabilidad temporal **incrementa con la resolución temporal** (ej. mayor para valores diarios que para medias mensuales).
- ▶ Las fluctuaciones son **más altas en invierno que en verano**.
- ▶ Reproducir **tendencias a largo plazo** requiere **series temporales largas** (recomendado 10 años).

# Variabilidad Espacial



- ▶ La variabilidad espacial depende de la **climatología local**.
- ▶ La variabilidad espacial es **mayor en invierno que en verano** para una misma localización.
- ▶ Las medidas son representativas de las localizaciones cercanas en una distancia limitada (aprox. 10 kms.)

# Resumen

## Requerimientos

Una estimación de la productividad de un SFV confiable y representativa en el largo plazo requiere:

- ▶ **Medidas Cercanas:**  $\leq 10 \text{ km}$
- ▶ **Series Temporales Largas:**  $\simeq 10 \text{ años}$

## ⑤ Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

# Estaciones Meteorológicas

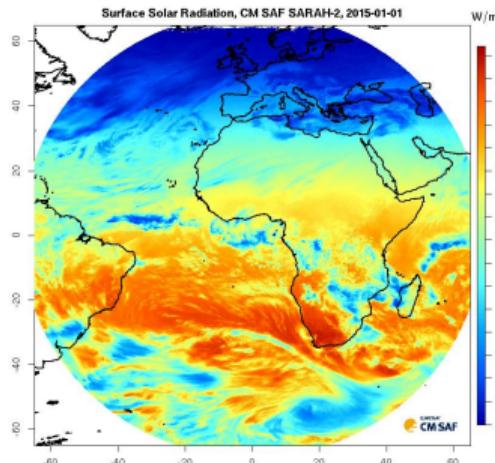
- ▶ Series temporales largas
- ▶ Alta resolución temporal (1 sec - 1 min)
- ▶ Baja resolución espacial.
- ▶ Los errores se deben al medidor (no se emplean modelos).

## Piranómetro



# Imágenes de Satelite

- ▶ Baja resolución temporal (15 min - 1 hora).
- ▶ Alta resolución espacial (15 km).
- ▶ La radiación global se estima mediante el procesado de las imágenes obtenidas por los radiómetros de los satélites.
- ▶ Los errores se deben a los modelos.



## Métodos Híbridos

- ▶ Las medidas terrestres se mezclan con las estimaciones de satélite para mejorar la resolución espacial.
- ▶ Interpolación Espacial.
  - ▶ **Inverse Distance Weighting (IDW)** ( $d$  es la distancia entre los puntos  $x_0$  y  $x_i$ )

$$\hat{G}_d(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i G_d(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

$$w_i = 1/d^2(x_0, x_i)$$

- ▶ **Kriging Ordinario**
- ▶ **Kriging with External Drift (KED)**

# Fuentes de Datos

<https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki>

- ▶ Estaciones Meteorológicas:

<https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/stations>

- ▶ Satélite

- ▶ NASA: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/nasa>
- ▶ CM SAF: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/cmsaf>
- ▶ LSA SAF: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/lsasaf>

- ▶ Métodos Híbridos

- ▶ PVGIS: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/pvgis>
- ▶ ADRASE: <https://github.com/oscarperpinan/mds/wiki/adrase>

## ⑤ Bases de Datos

Introducción

Fuentes de Datos

Control de Calidad

# Introducción

- ▶ Es necesario filtrar y corregir las medidas para eliminar datos erróneos y valores extremos.
  - ▶ Límites Físicos
  - ▶ Coherencia Espacial
  - ▶ Análisis Estadístico de las Desviaciones

## Límites Físicos

- ▶ El índice de claridad no puede ser mayor que 1 (la irradiación global diaria no puede superar la extra-atmosférica).

$$K_{dT} \leq 1$$

$$G_d(0) \leq B_{0d}(0)$$

- ▶ El índice de claridad debe ser al menos 0.03

$$K_t = \frac{G_d(0)}{B_{0d}(0)} \geq 0.03$$

## Coherencia Espacial

- ▶ Las medidas de una estación se deben comparar con **estaciones cercanas** (por ejemplo, mediante interpolación espacial).
- ▶ La comparación se debe realizar con **valores agregados** (medias diarias o mensuales).

# Análisis Estadístico de las Desviaciones

- Desviaciones,  $\mathbf{D}$ , entre observaciones,  $\mathbf{O}$ , y un modelo,  $\mathbf{M}$  (u otro conjunto de observaciones):

$$\mathbf{O} = \{o_1 \dots o_n\}$$

$$\mathbf{M} = \{m_1 \dots m_n\}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{M} - \mathbf{O} = \{(m_1 - o_1) \dots (m_n - o_n)\} = \{d_1 \dots d_n\}$$

# Exactitud (*bias*) y Precisión (*variance*)

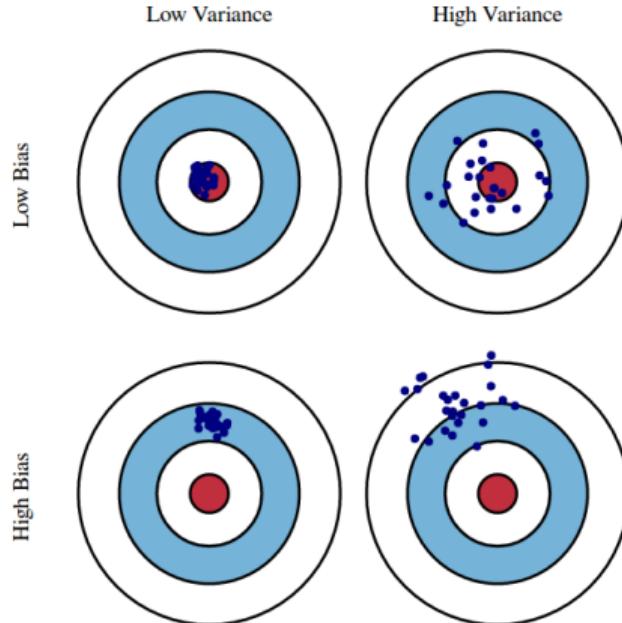


Fig. 1 Graphical illustration of bias and variance.

## Métricas

- **Mean Bias Difference (MBD)**, diferencia media (indica si el modelo sobreestima o subestima):

$$MBD = \bar{\mathbf{D}} = \bar{\mathbf{M}} - \bar{\mathbf{O}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i)$$

- **Root Mean Square Difference (RMSD)**, diferencia cuadrático media:

$$RMSD = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{1/2} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i)^2 \right)^{1/2}$$

- **Mean Absolute Deviation (MAD)** (El RMSD no es robusto, un error puntual puede distorsionar el estimador, y depende del número de muestras)

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |m_i - o_i|$$

- ① Introducción
- ② Geometría Sol y Tierra
- ③ Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- ④ Cálculo de componentes de radiación solar
- ⑤ Bases de Datos
- ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

### Introducción

Tipos de Sistemas

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Irradiancia a partir de radiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

# Ángulo de Inclinación

- ▶ Los generadores FV tienen un ángulo de inclinación positivo para maximizar el rendimiento.
- ▶ Este ángulo depende de la latitud del lugar y de la aplicación del sistema.



## Definiciones

- ▶  $\theta_s$ , **ángulo de incidencia (AOI)**, ángulo entre los rayos solares y la perpendicular al plano del generador.
- ▶  $\alpha$ : **orientación del generador** ( $0^\circ$  cuando está orientado al mediodía solar)
- ▶  $\beta$ : **inclinación del generador** (respecto de la superficie horizontal)

## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Irradiancia a partir de radiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

# Sistema Estático



# Sistemas con seguimiento

- ▶ **Fundamento:**
  - ▶ Radiación incidente aumenta al seguir al sol
  - ▶ Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora

# Sistemas con seguimiento

- ▶ **Fundamento:**
  - ▶ Radiación incidente aumenta al seguir al sol
  - ▶ Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora
- ▶ Las diferentes técnicas de seguimiento son un **compromiso** entre
  - ▶ un **apuntamiento perfecto**
  - ▶ **sistemas estructurales más económicos**
  - ▶ mejores **aprovechamientos del terreno.**

# Algunos tipos de seguimiento solar

## ► Doble eje

- ▶ Apuntamiento «perfecto»
- ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

# Algunos tipos de seguimiento solar

- ▶ **Doble eje**
  - ▶ Apuntamiento «perfecto»
  - ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.
- ▶ **Seguimiento acimutal**
  - ▶ Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.

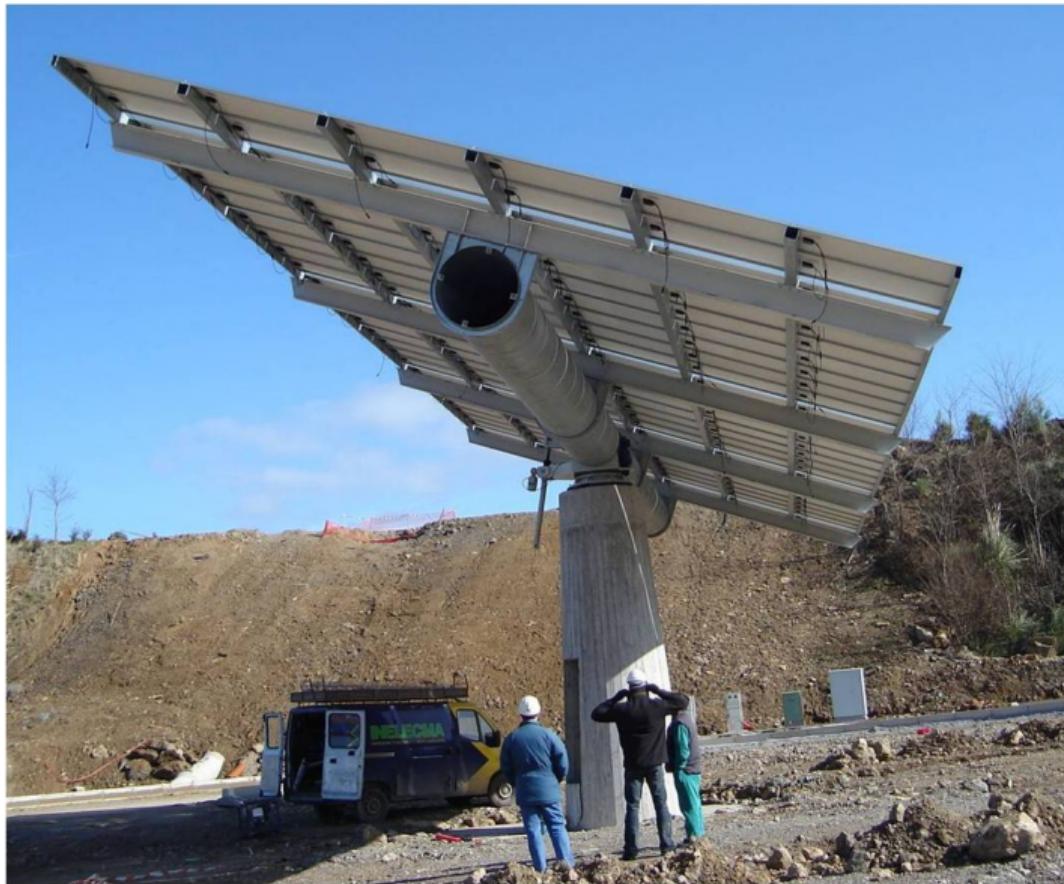
# Algunos tipos de seguimiento solar

- ▶ **Doble eje**
  - ▶ Apuntamiento «perfecto»
  - ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.
- ▶ **Seguimiento acimutal**
  - ▶ Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.
- ▶ **Seguimiento horizontal con eje Norte-Sur**
  - ▶ Sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios),
  - ▶ Facilidad de motorización,
  - ▶ Buen aprovechamiento del terreno.

## Sistema de Seguimiento(1 eje, horizontal N-S)



## Sistema de Seguimiento (2x ejes)



## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

**Geometría de los sistemas fotovoltaicos**

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

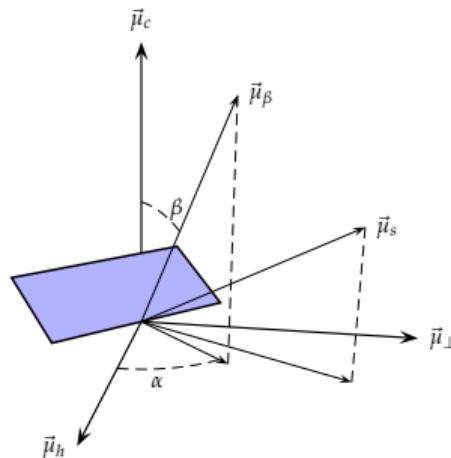
Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

# Ángulo de Incidencia Sistema Estático

- Si  $\alpha = 0$

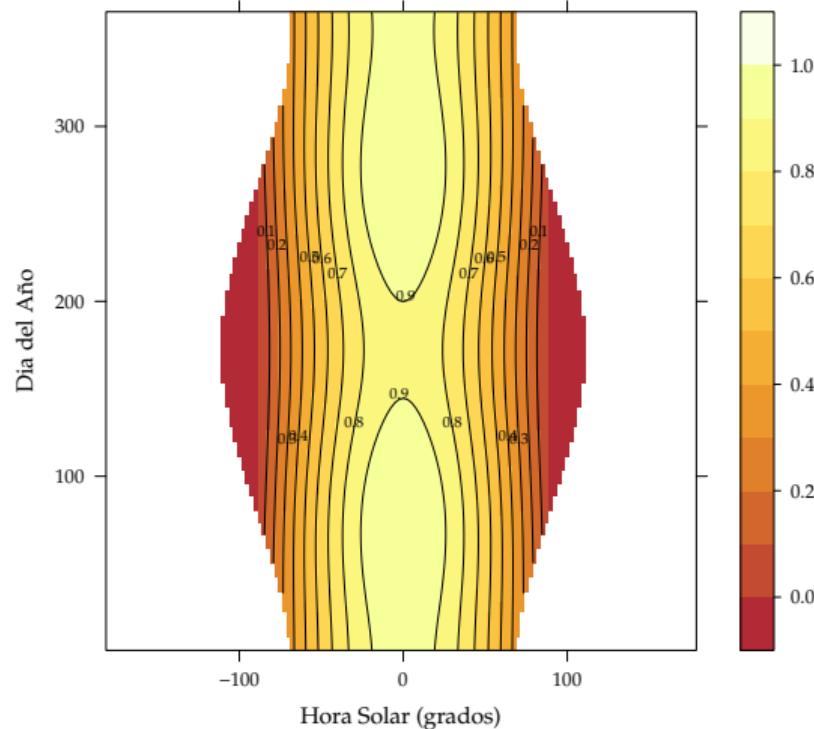
$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta - |\phi|) - \text{sign}(\phi) \cdot \sin(\delta) \sin(\beta - |\phi|)$$



- Inclinación Óptima  $\beta_{opt} \simeq |\phi| - 10$ .

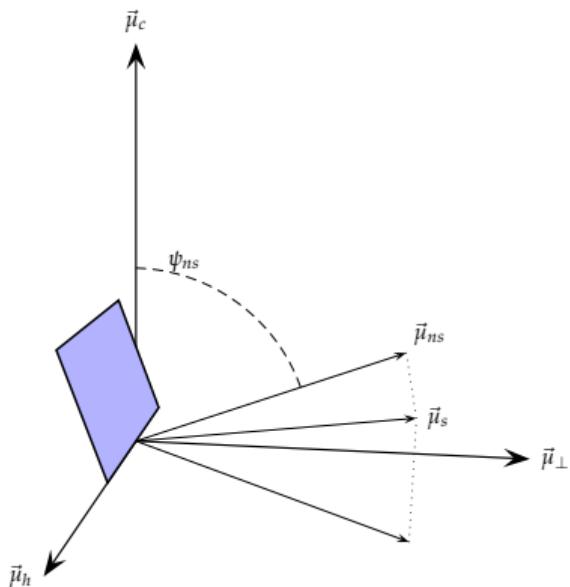
# Sistema Estático: Ángulo de Incidencia

►  $40^{\circ}N$



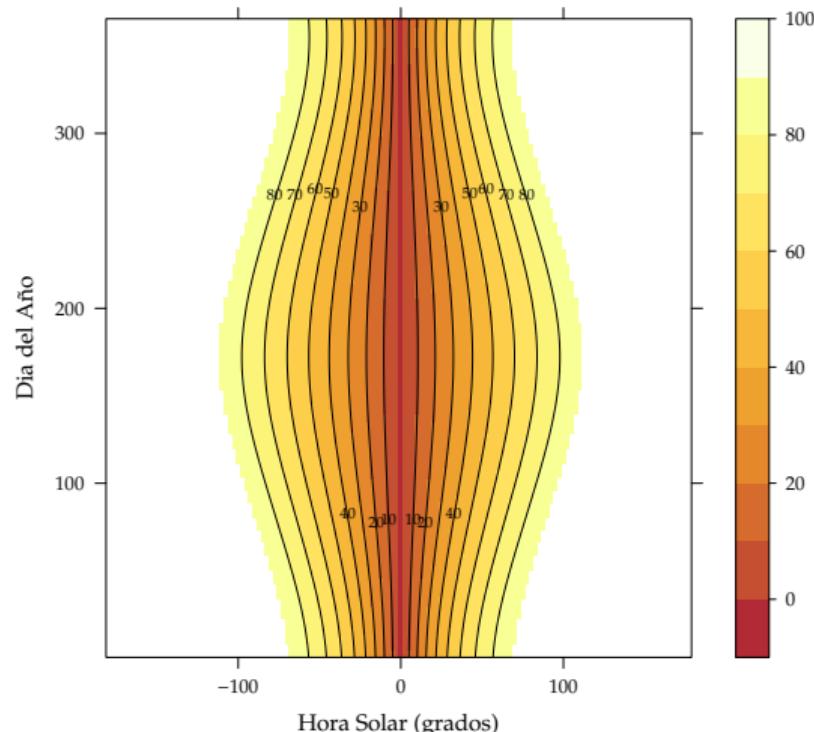
# Ángulo de Incidencia Seguidor 1x NS

$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \sqrt{\sin^2(\omega) + (\cos(\omega) \cos(\phi) + \tan(\delta) \sin(\phi))^2}$$



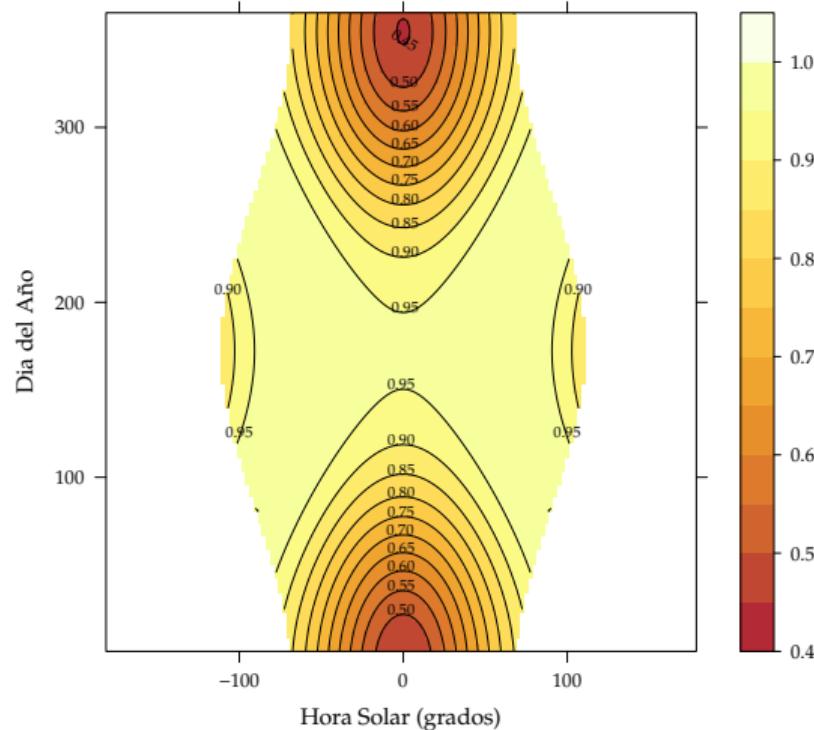
# Ángulo de Inclinación Seguidor 1x NS

►  $40^{\circ}N$

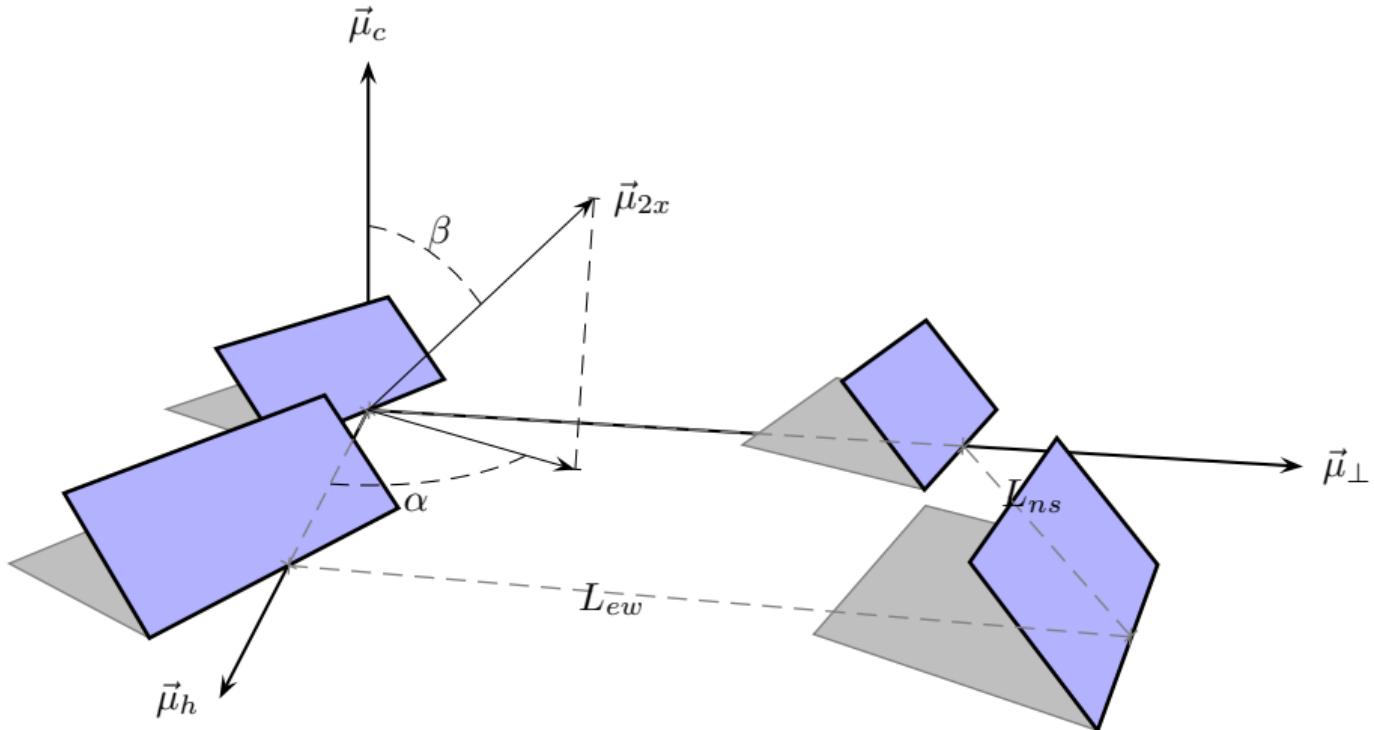


# Ángulo de Incidencia Seguidor 1x NS

►  $40^{\circ}N$



# Ángulo de Incidencia Seguidor 2x



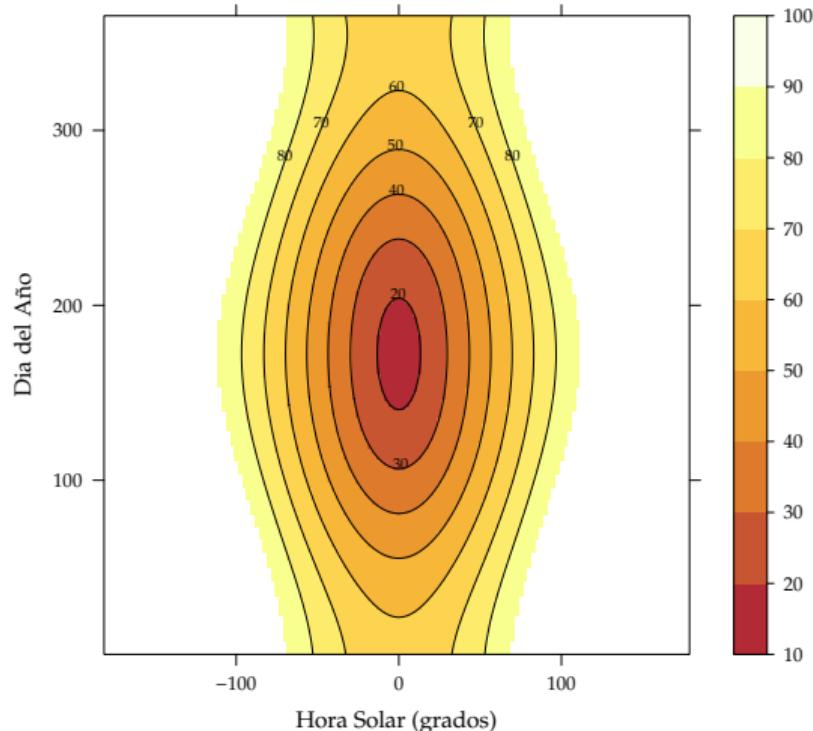
$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

$$\cos(\theta_s) = 1$$

# Inclinación Seguidor 2x

►  $40^{\circ}N$



## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

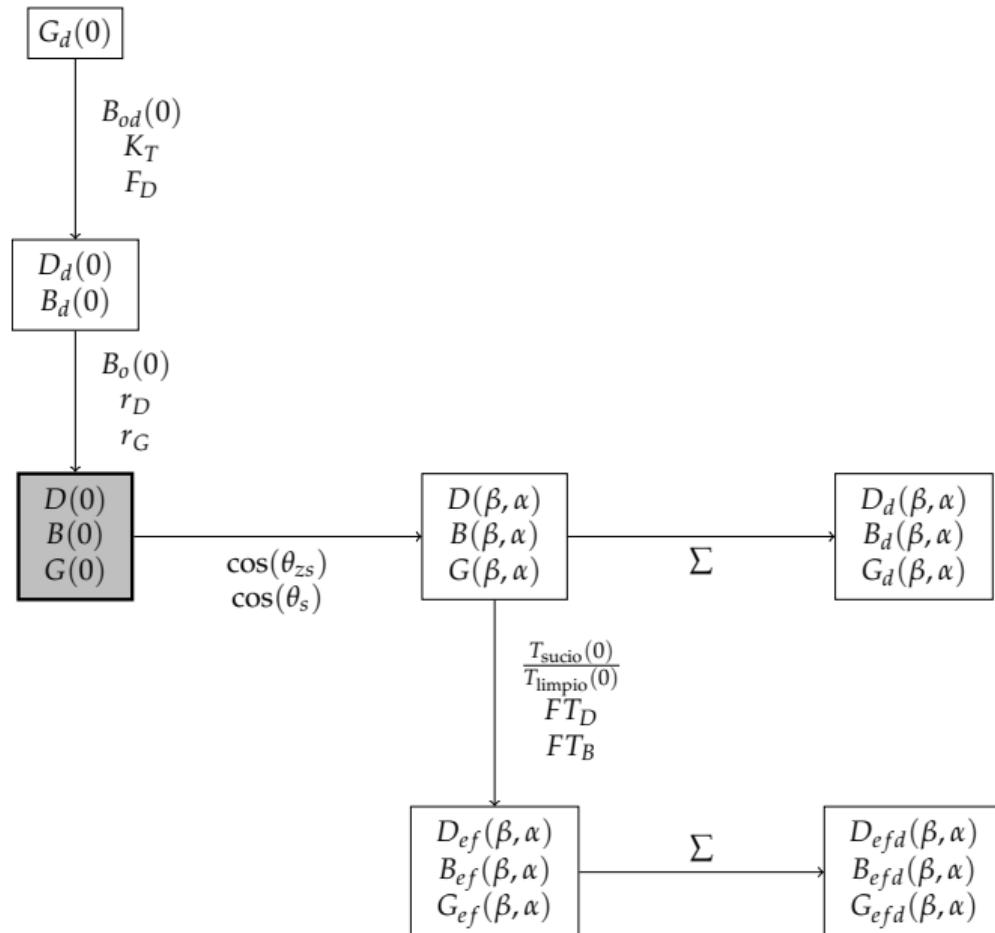
Geometría de los sistemas fotovoltaicos

**Irradiancia a partir de irradiación diaria**

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías



## Planteamiento

- ▶ **Objetivo:** construir un perfil diario promedio de valores de *irradiancia* global y difusa,  $G(0), D(0)$ , a partir de valores de *irradiación* global y difusa diaria,  $G_d(0), D_d(0)$ .
- ▶ **Problema:** conocemos el área de la curva,  $G_d(0)$ , pero pretendemos obtener los valores que conforman la curva,  $G(0)$ .
- ▶ **Solución:** empleamos un modelo de **cielo claro** a partir de la ratio entre la irradiancia e irradiación extra-atmosférica.

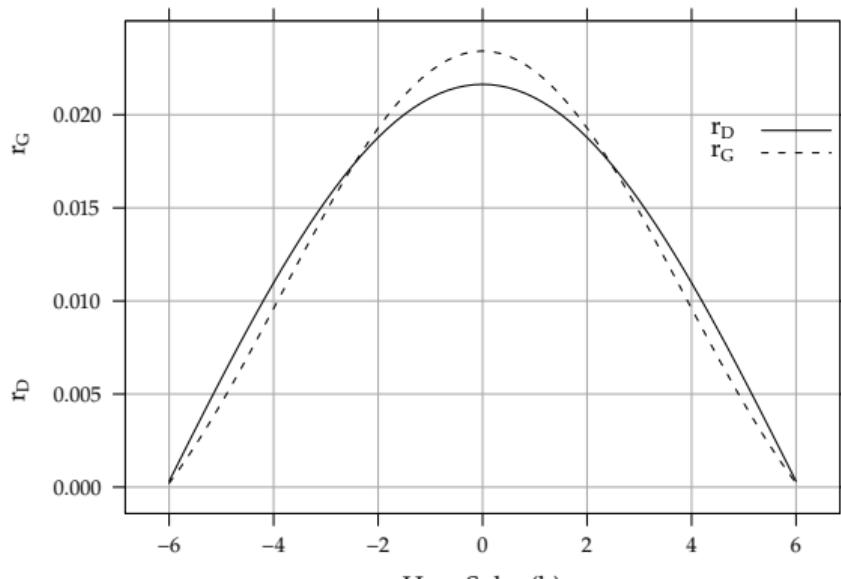
$$\frac{D(0)}{D_d(0)} = \frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)}$$

- ▶ **Limitación:** Este modelo es válido como promedio a largo plazo (no es representativo de un día concreto).

# Perfil

$$D(0) = r_D \cdot D_d(0)$$

$$G(0) = r_G \cdot G_d(0)$$



# Ecuaciones

$$r_D = \frac{B_o(0)}{B_{0d}(0)} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\omega_s \cdot \cos(\omega_s) - \sin(\omega_s)}$$

$$r_G = r_D \cdot (a + b \cdot \cos(\omega))$$

$$a = 0.409 - 0.5016 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

## Ejemplo de cálculo

Calcula la irradiancia global y la irradiancia difusa en el plano horizontal 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con media mensual de irradiación global diaria horizontal  $G_{d,m}(0) = 4150 \text{ Wh m}^{-2}$ .

## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

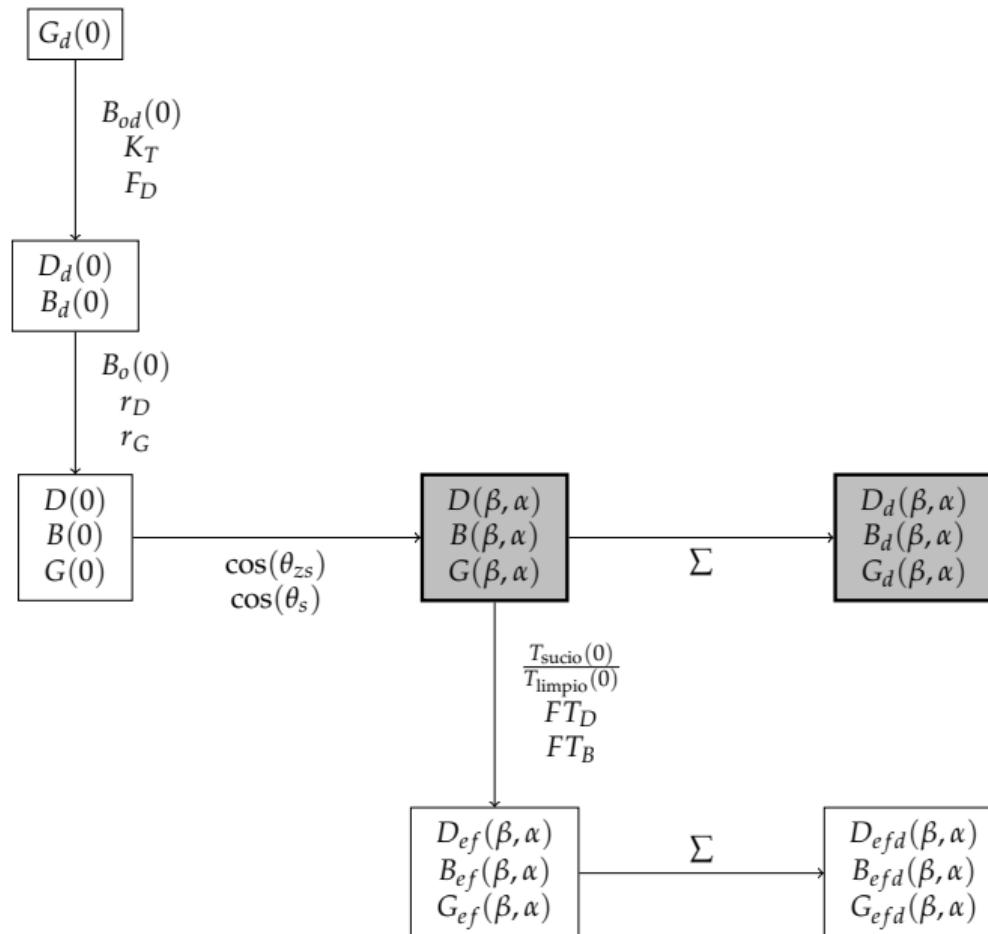
Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Irradiancia a partir de radiación diaria

**Transformación al plano del generador**

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías



## Planteamiento

- ▶ **Irradiancia Directa**  $B(\beta, \alpha)$ : ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).
- ▶ **Irradiancia Difusa**  $D(\beta, \alpha)$ : modelos del estado de cielo, modelo isotrópico o anisotrópico.
- ▶ **Irradiancia de Albedo**  $R(\beta, \alpha)$ : modelo isotrópico con coeficiente de reflexión típico.

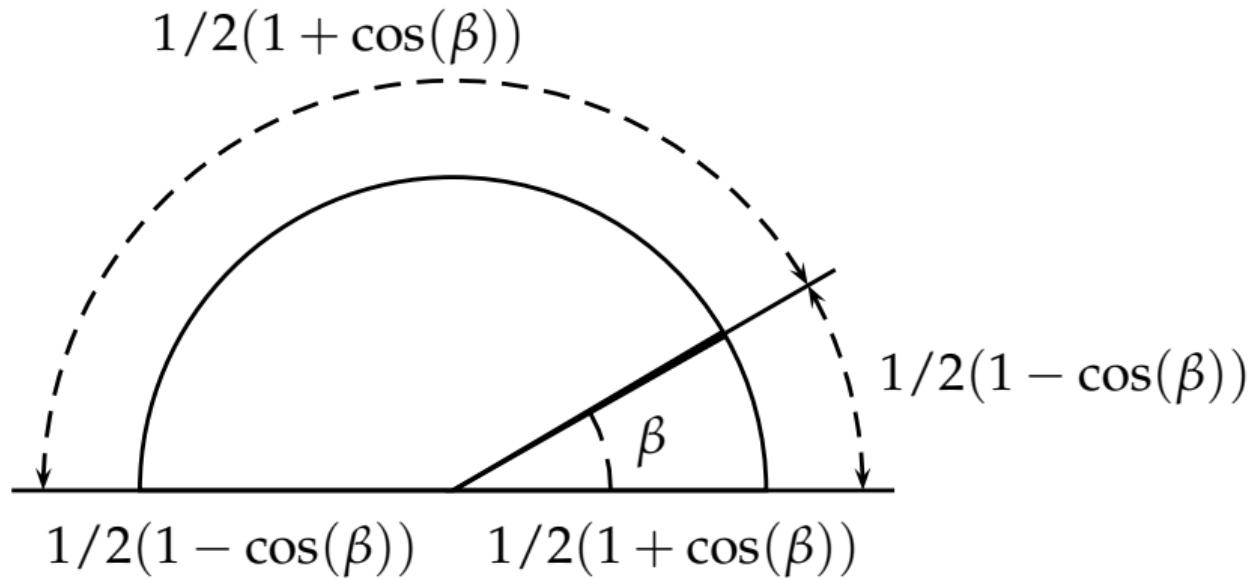
$$G(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) + D(\beta, \alpha) + R(\beta, \alpha)$$

## Irradiancia Directa

**Irradiancia Directa:** ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).

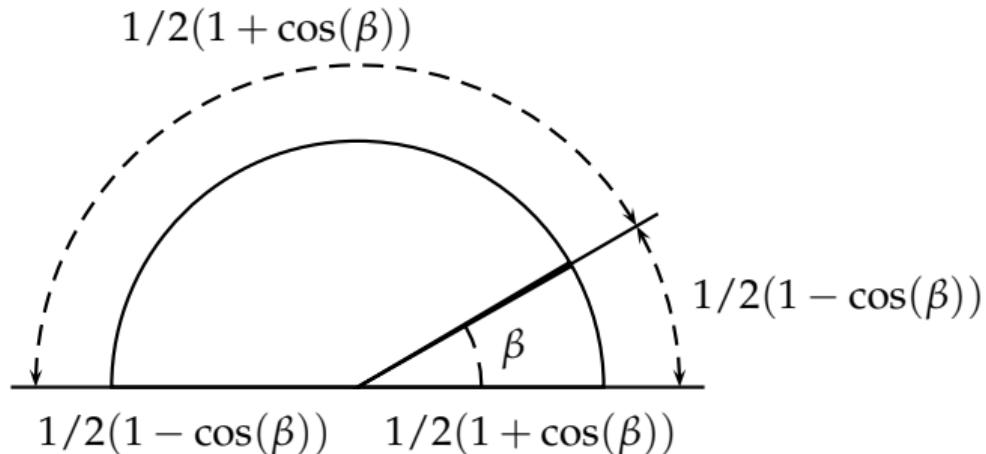
$$B(\beta, \alpha) = B(0) \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

## Irradiancia Difusa



$$D(\beta, \alpha) = \int_{\Omega} L(\theta_z, \psi) \cdot \cos(\theta_z') d\Omega$$

# Irradiancia Difusa Isotrópica



$$L(\theta_z, \psi) = cte.$$

$$D(\beta, \alpha) = D(0) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

# Irradiancia Difusa Anisotrópica

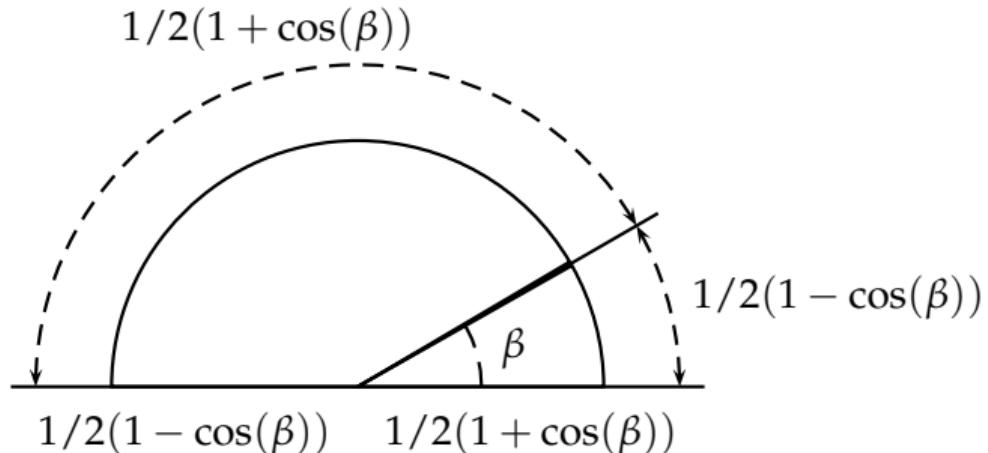
$$D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha)$$

$$D^I(\beta, \alpha) = D(0) \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$$D^C(\beta, \alpha) = D(0) \cdot k_1 \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

$$k_1 = \frac{B(0)}{B_0(0)}$$

# Irradiancia de Albedo



$$R(\beta, \alpha) = \rho \cdot G(0) \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

$$\rho = 0.2$$

## Valores diarios

Los valores diarios son la suma de los valores horarios a lo largo de un día.

$$G_d(\alpha, \beta) = \sum_d G_h(\alpha, \beta)$$

$$D_d(\alpha, \beta) = \sum_d D_h(\alpha, \beta)$$

$$B_d(\alpha, \beta) = \sum_d B_h(\alpha, \beta)$$

## Ejemplo de cálculo

Calcula la irradiancia difusa, directa, de albedo y global, en un generador inclinado  $30^\circ$  y orientado al Sur, 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud  $\phi = 40^\circ\text{N}$  y con media mensual de irradiación global diaria horizontal  $G_{d,m}(0) = 4150 \text{ Wh m}^{-2}$ .

## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

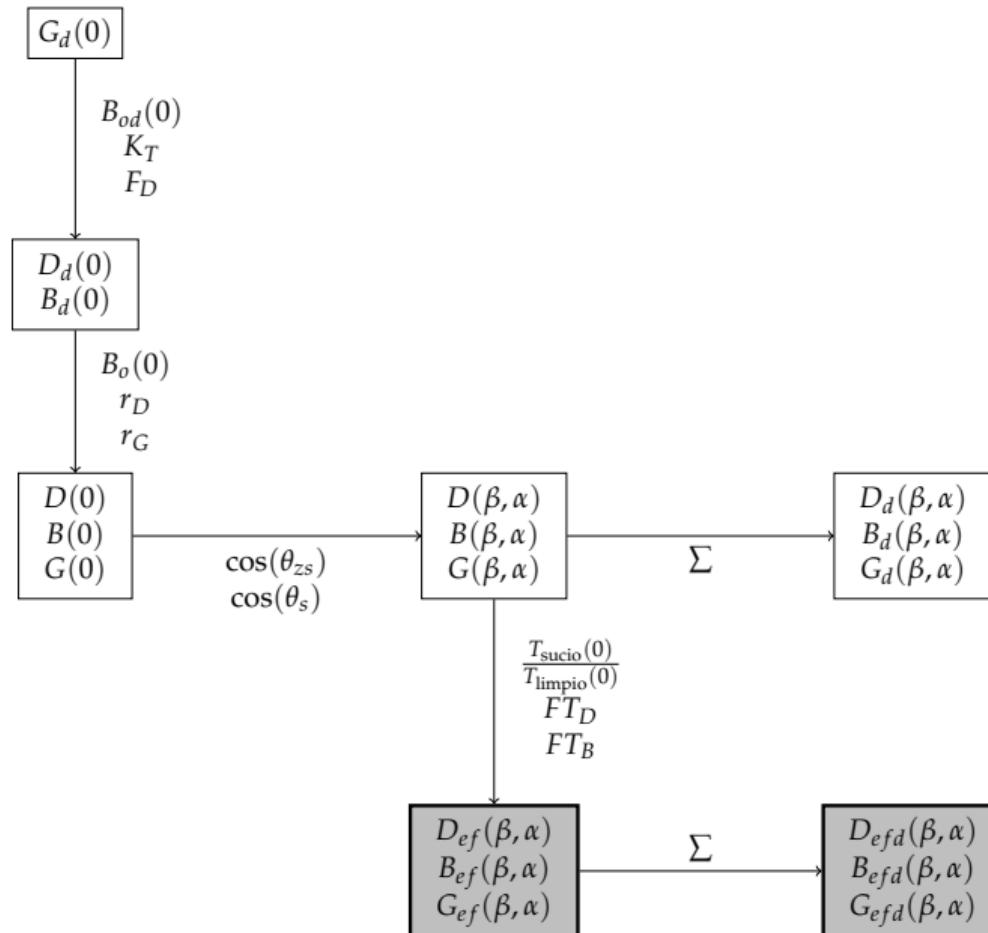
Geometría de los sistemas fotovoltaicos

Irradiancia a partir de radiación diaria

Transformación al plano del generador

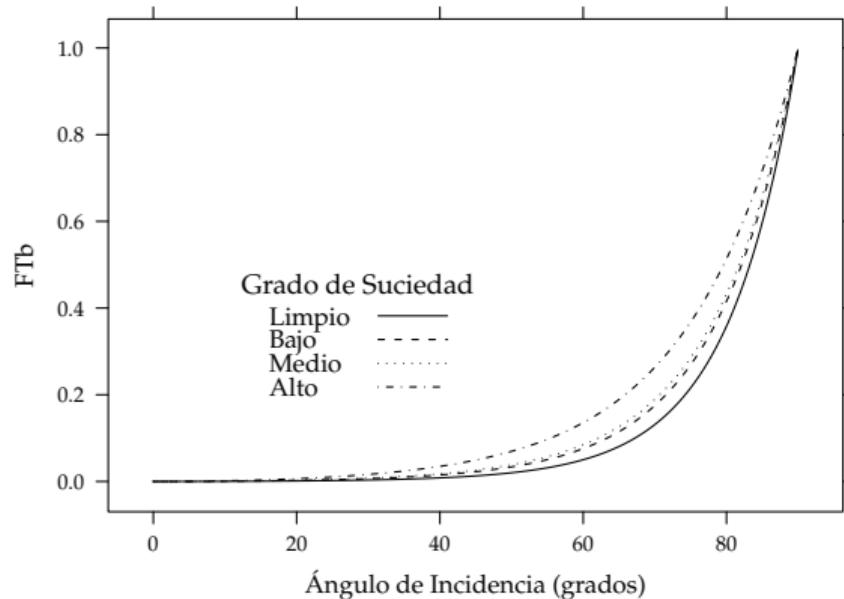
Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías



# Radiación directa

$$B_{ef}(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$



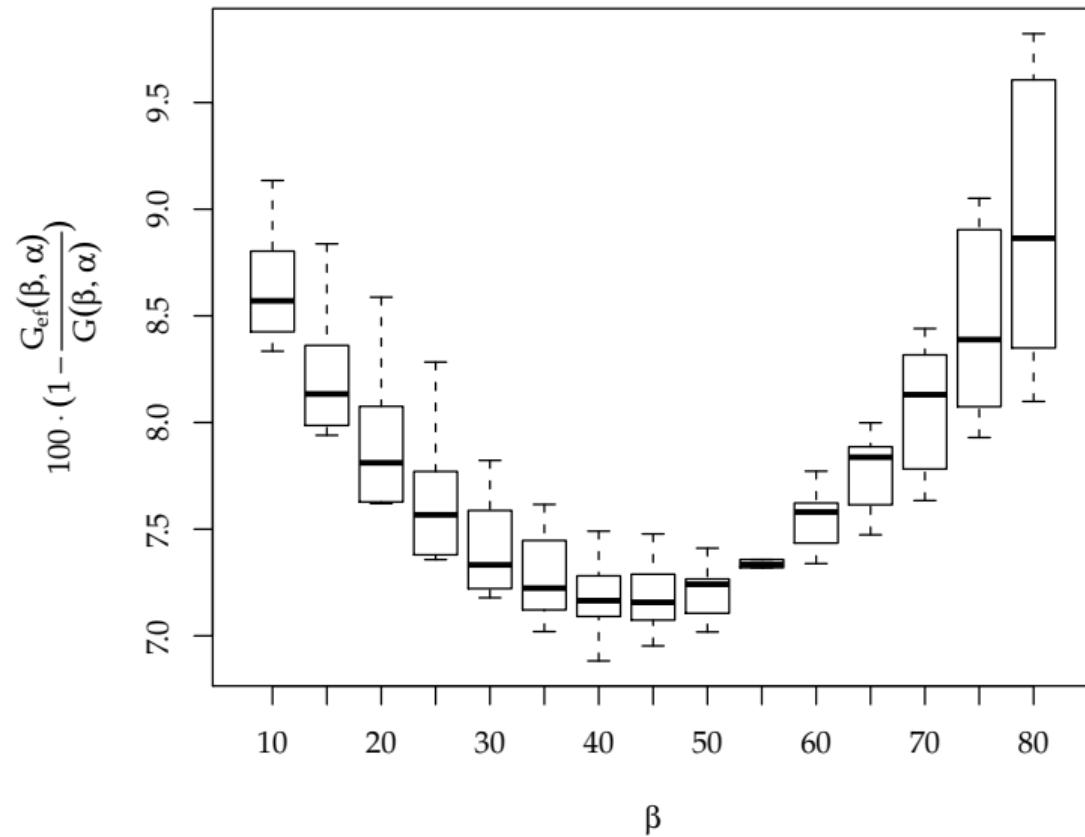
## Difusa y Albedo

$$D_{ef}^{iso}(\beta, \alpha) = D^{iso}(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_D(\beta))$$

$$D_{ef}^{cir}(\beta, \alpha) = D^{cir}(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_B(\theta_s))$$

$$R_{ef}(\beta, \alpha) = R(\beta, \alpha) \cdot \left[ \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_R(\beta))$$

## Pérdidas anuales



## ⑥ Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

Tipos de Sistemas

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

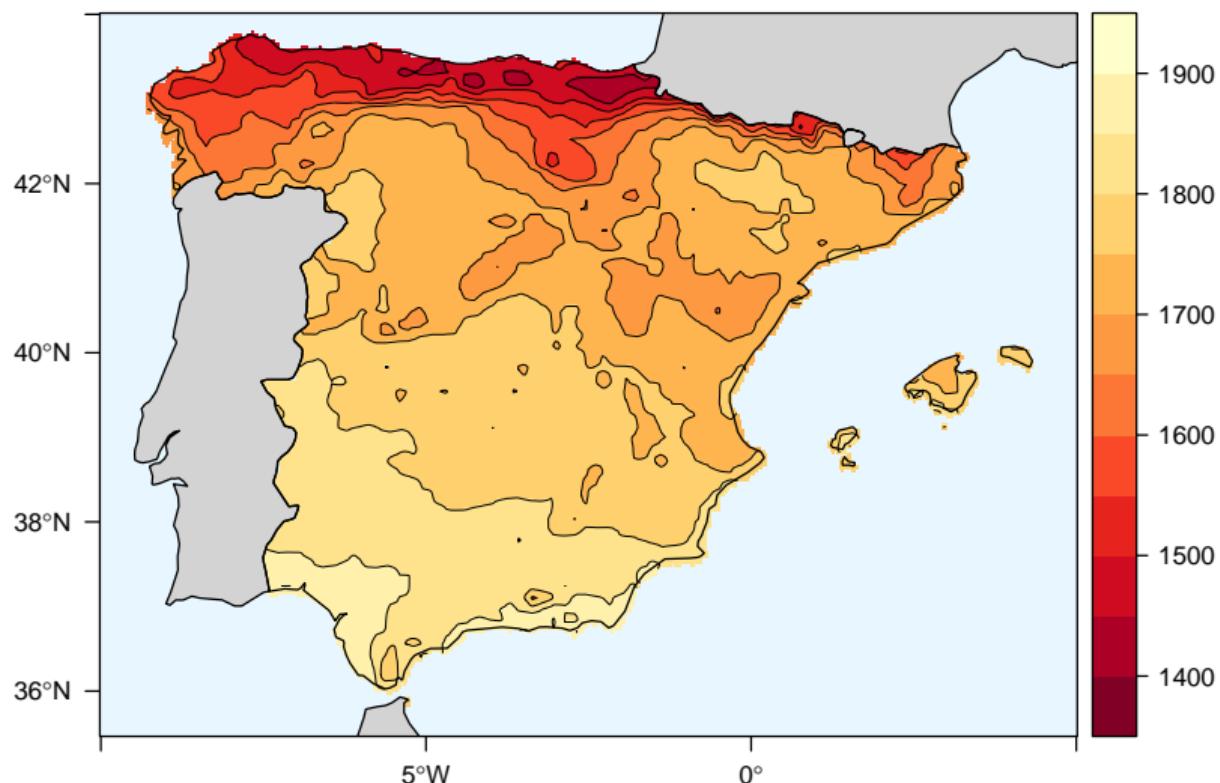
Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

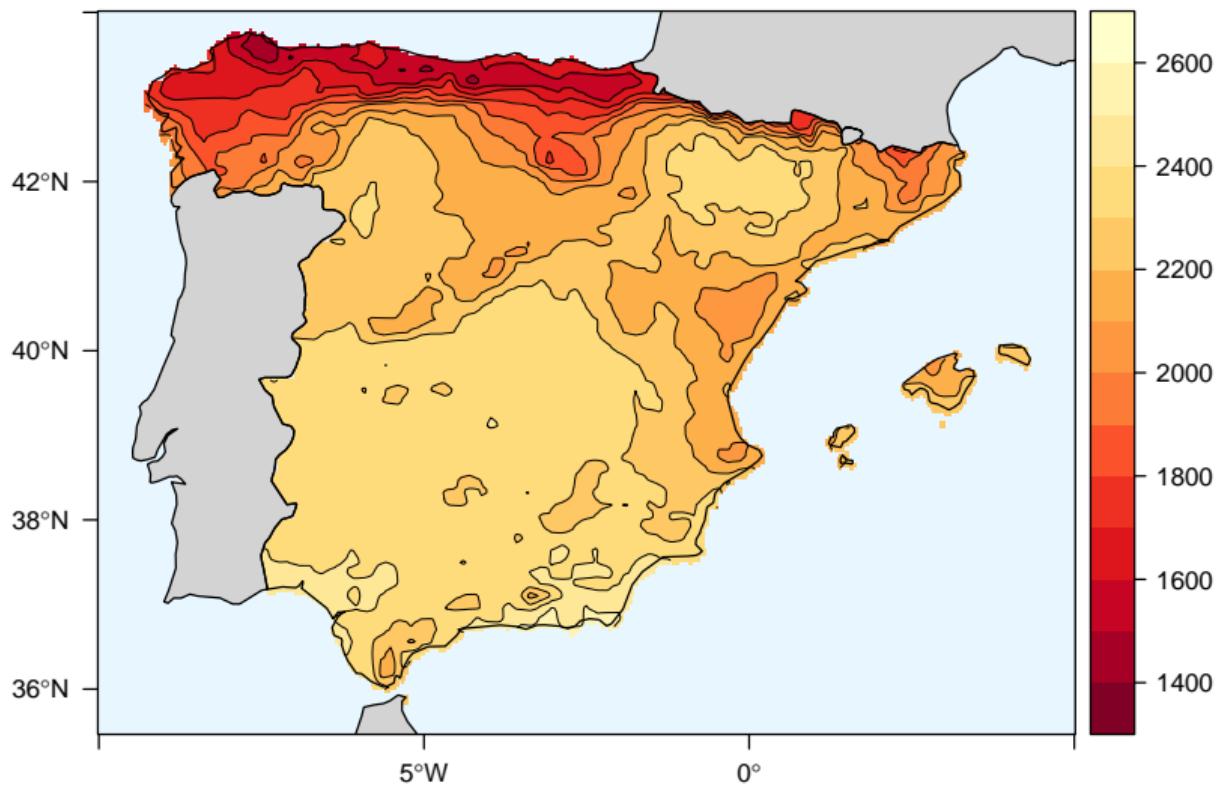
Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

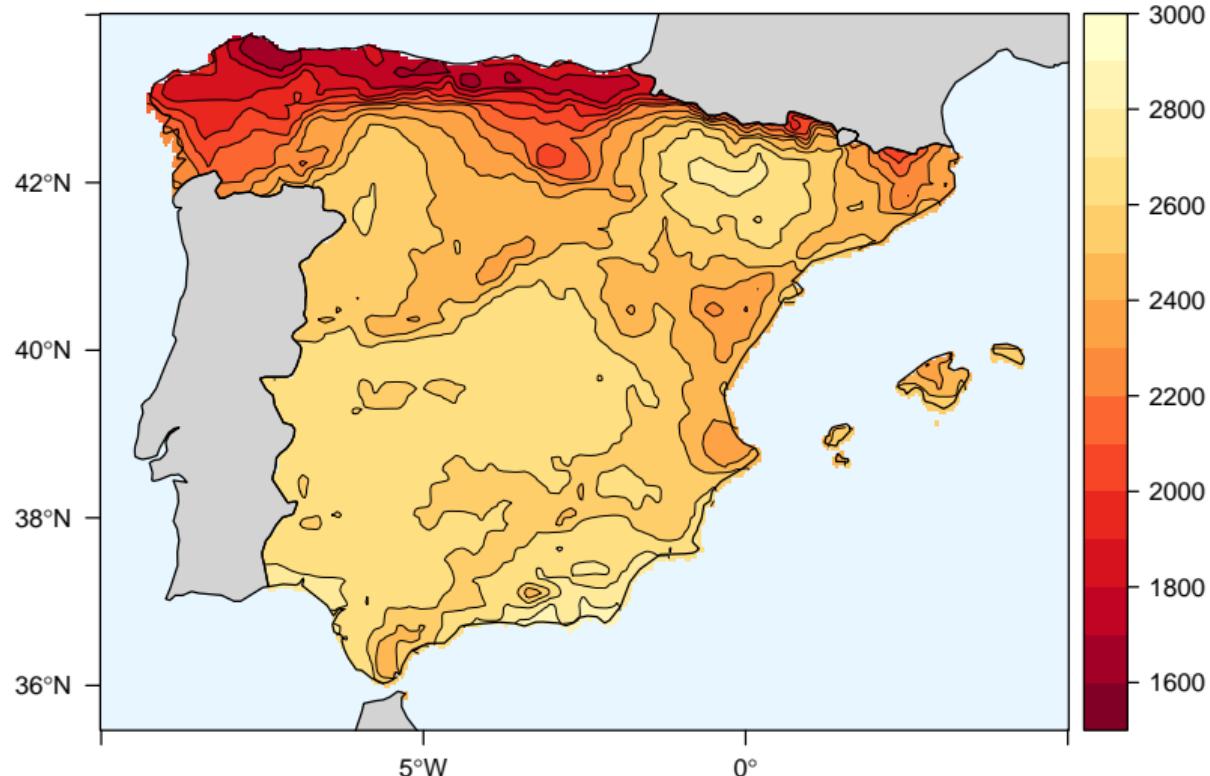
# Radiación en Sistema estático



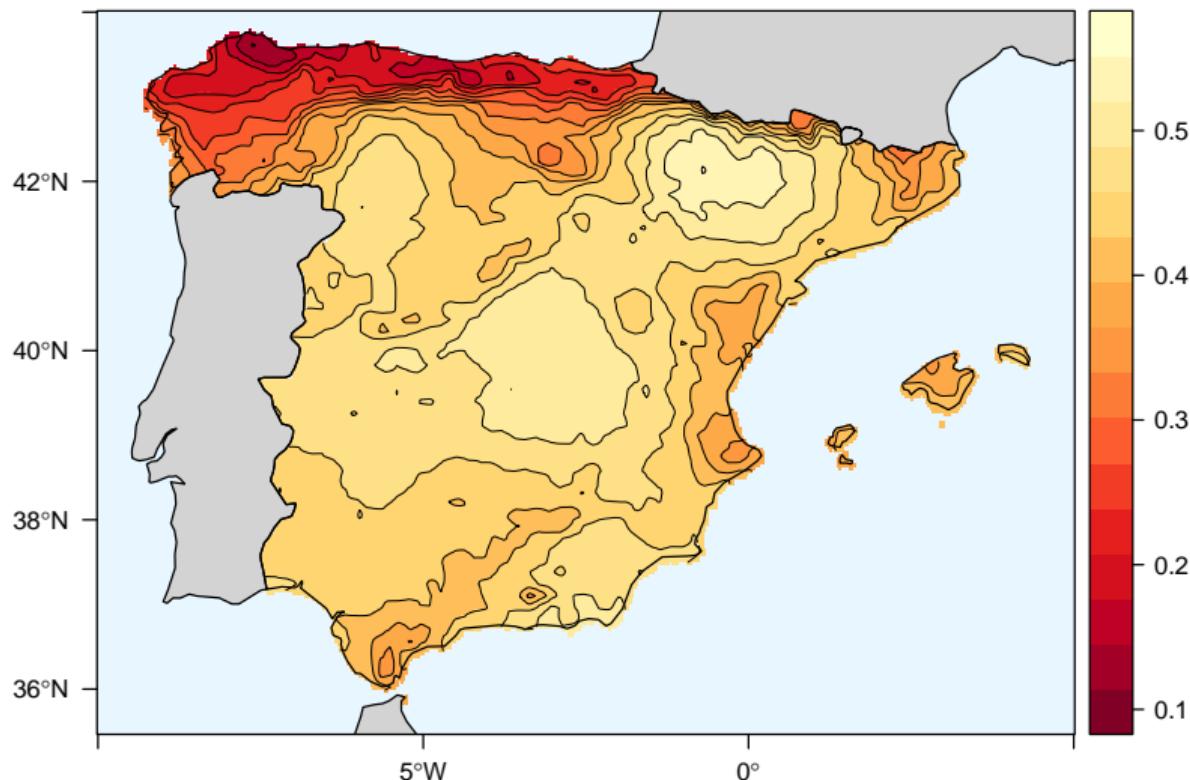
# Radiación en Seguimiento Eje Horizontal



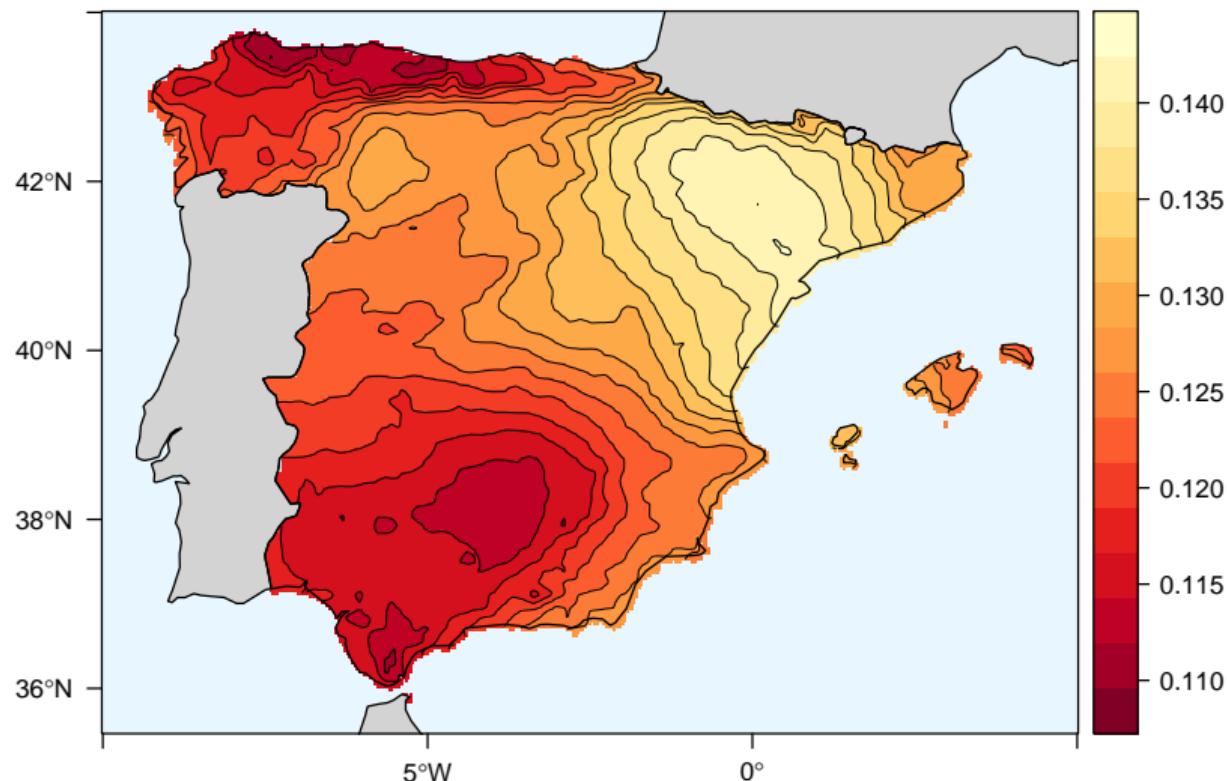
# Radiación en Seguimiento Doble Eje



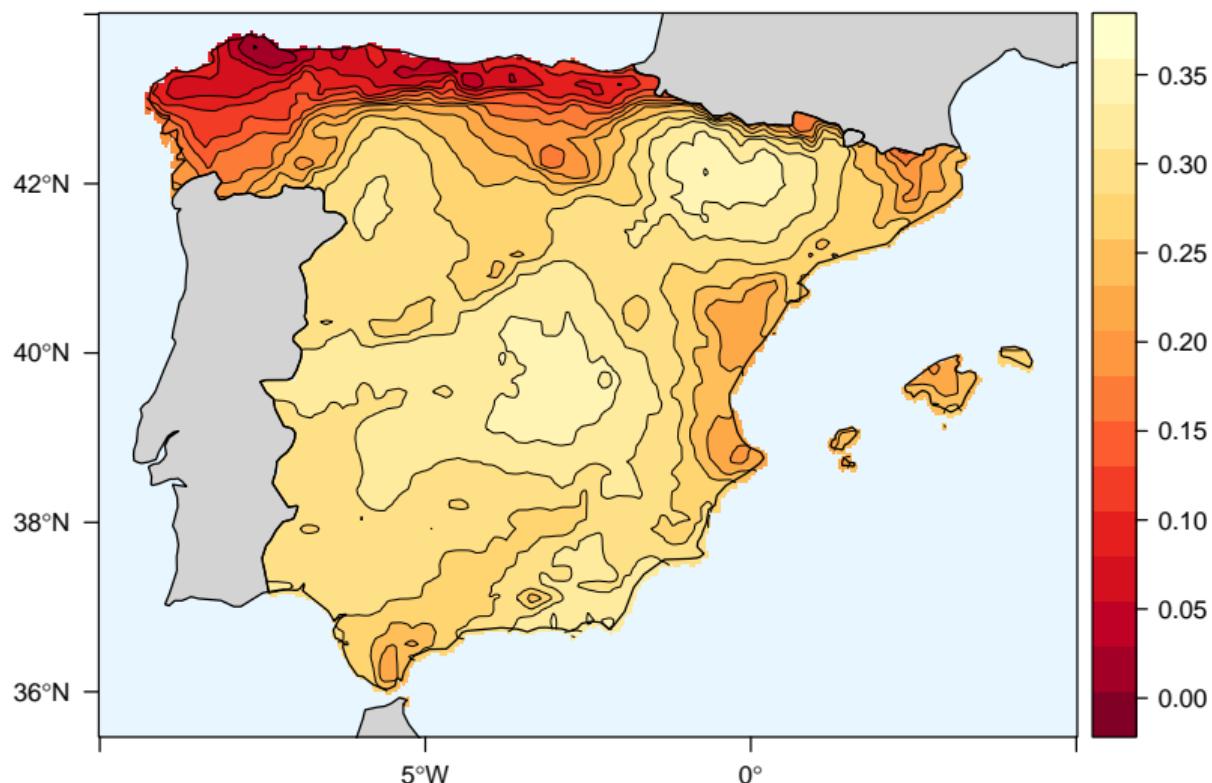
# Comparación Doble Eje-Estática



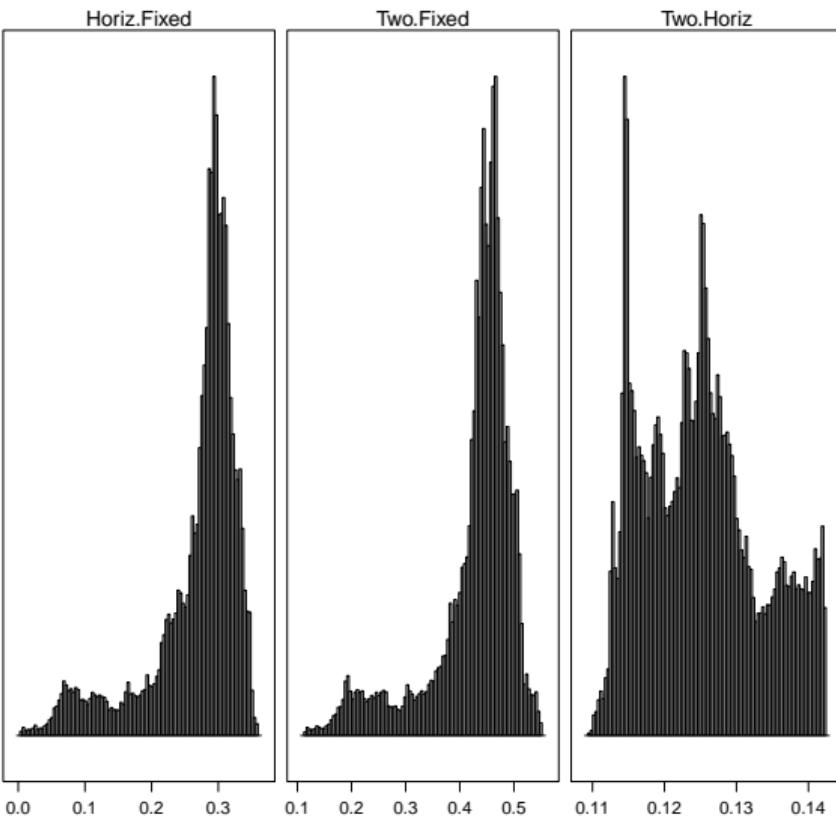
# Comparación Doble Eje - Horizontal



# Comparación Eje Horizontal - Estática



# Comparación entre Sistemas



# Comparación entre Sistemas

