

Radiación Solar

Energía Solar Fotovoltaica

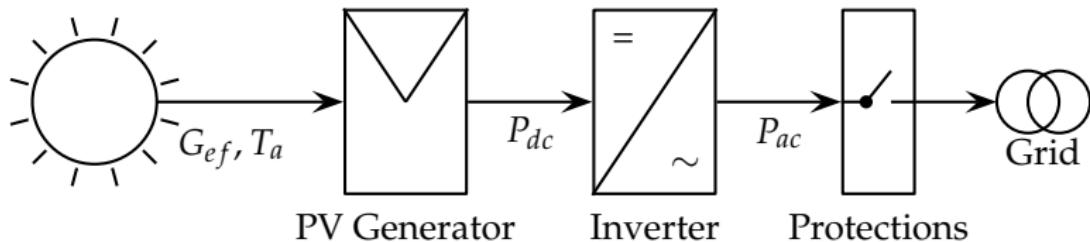
Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

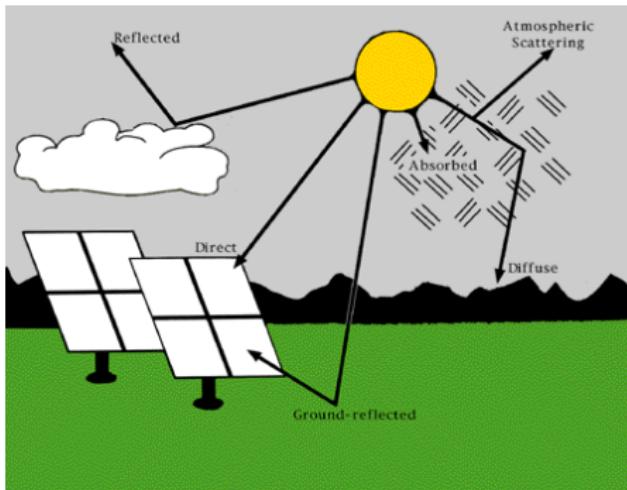
Radiación Solar y Sistemas Fotovoltaicos

- 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 requiere medidas terrestres o imágenes de satélite.



Ángulo de Inclinación

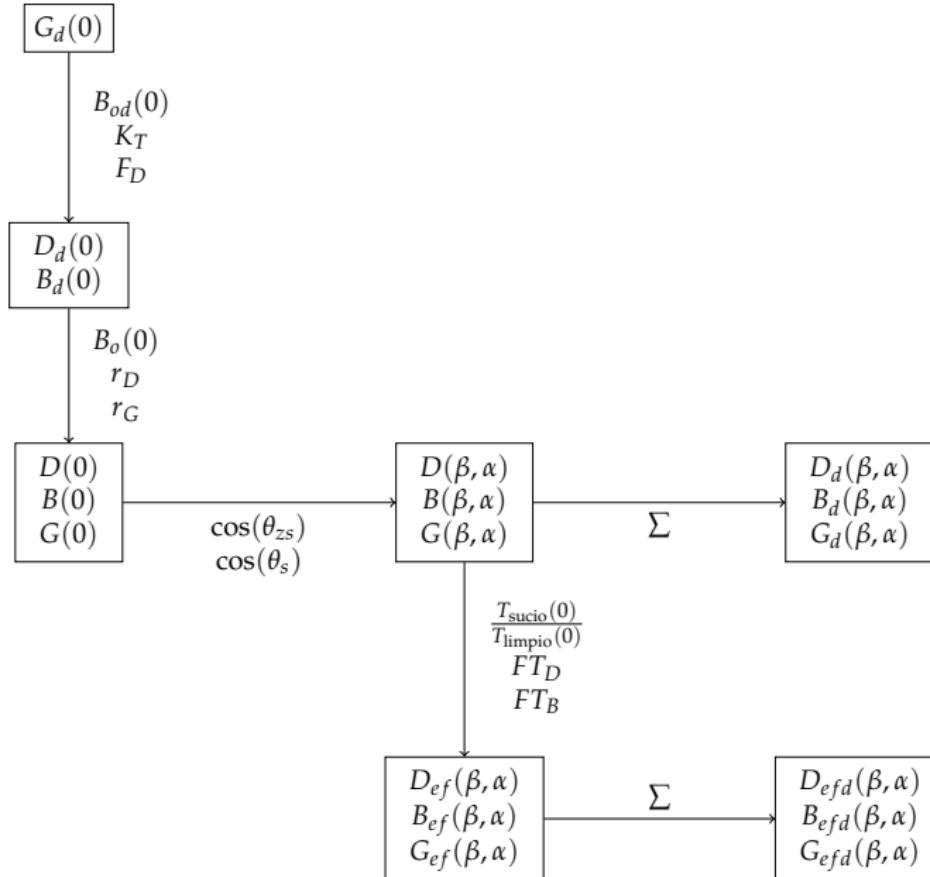
- Los generadores FV tienen un **ángulo de inclinación positivo** para maximizar el rendimiento.
- Este ángulo depende de la **latitud** del lugar y de la **aplicación del sistema**.



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 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

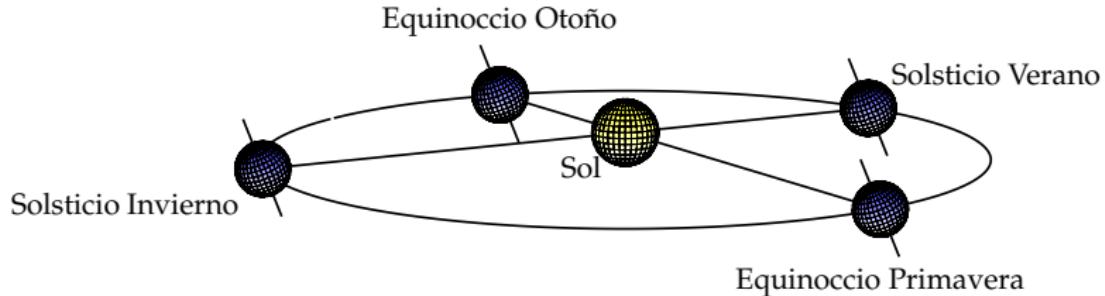
3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5 Bases de Datos

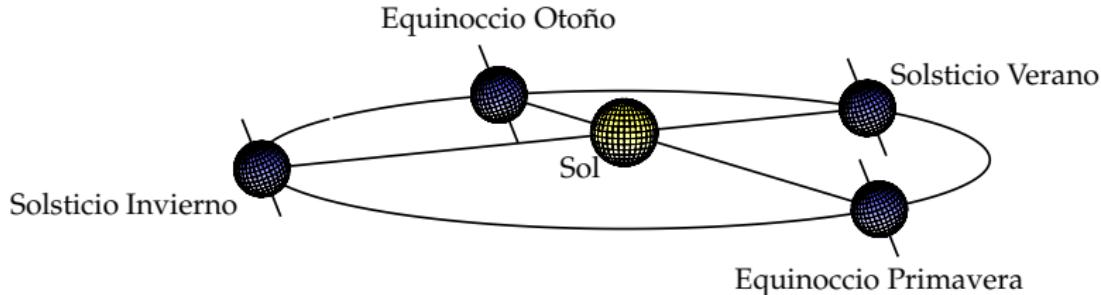
6 Radiación Solar en Generadores FV

Movimiento terrestre



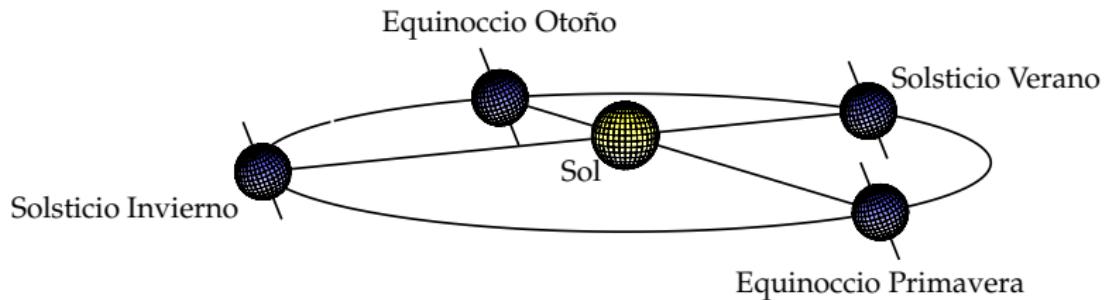
- La Tierra **gira sobre si misma** alrededor de su eje polar.
 - ▶ Periodo aproximado: 24 horas.

Movimiento terrestre



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

Movimiento terrestre



- Entre el eje polar y el plano de la eclíptica hay un ángulo constante de $23,45^\circ$.
- Entre el plano ecuatorial y la linea que une la Tierra y el Sol hay un ángulo variable: *declinación*.

1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

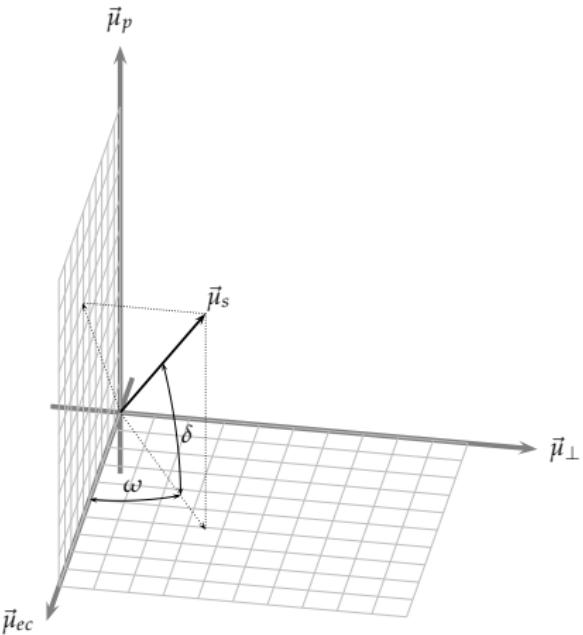
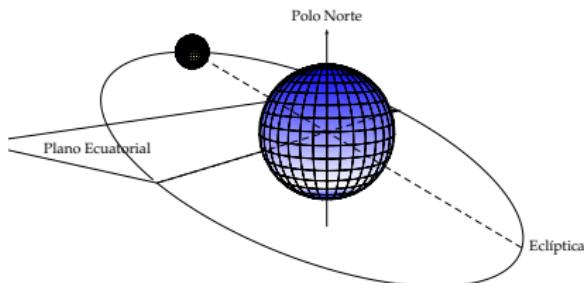
3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5 Bases de Datos

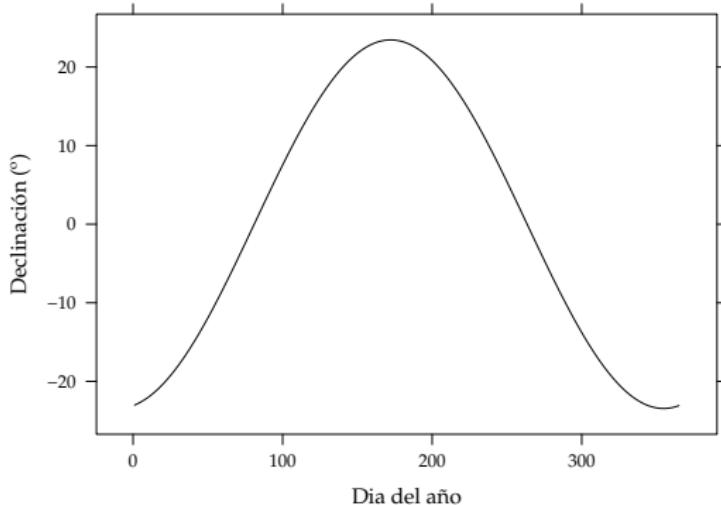
6 Radiación Solar en Generadores FV

Ejes terrestres



- **Declinación**, δ : 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 anocchece 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

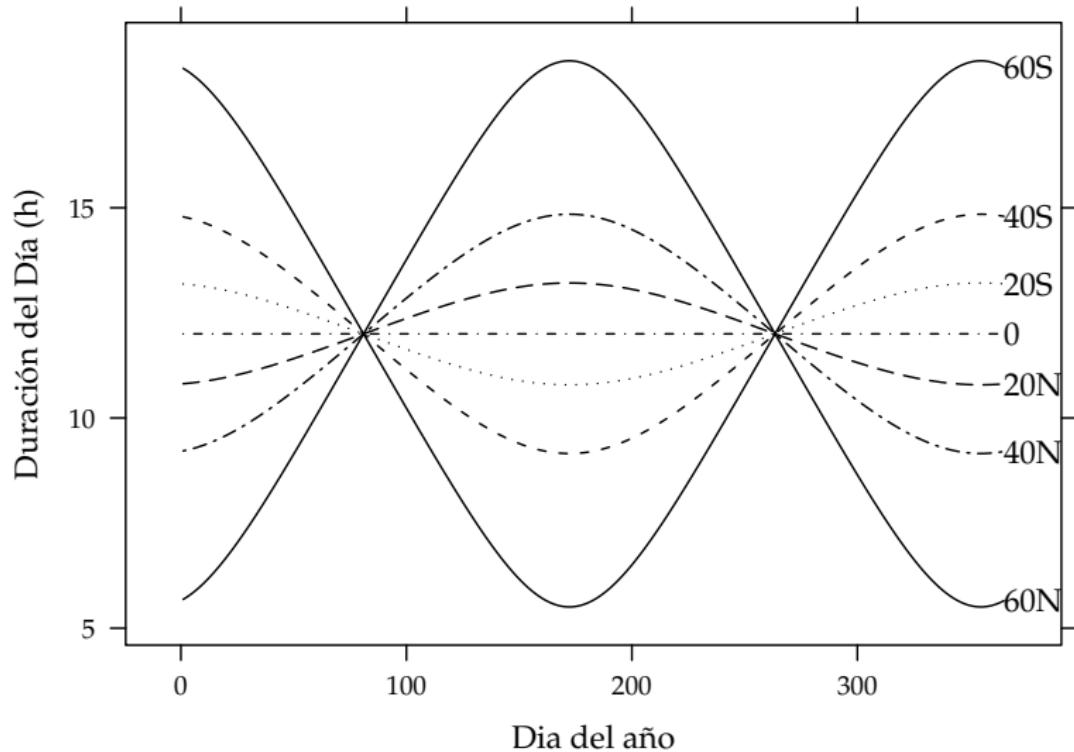
- w , diferencia entre instante en curso y el mediodía solar ($w = 0$, $\psi_s = 0$).
- Criterio de signos: $w < 0$ antes del mediodía.
- $1\text{h} = 15^\circ$ ($24\text{h} = 2\pi$ radians = 360)
- (Horas) $-12, -11, -10, \dots, -1, \mathbf{0}, 1, \dots, 10, 11, 12$

Amanecer ($\gamma_s = 0$)

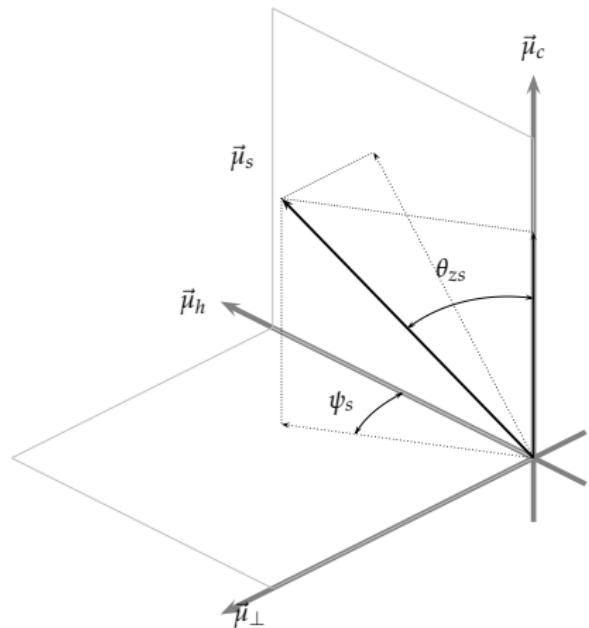
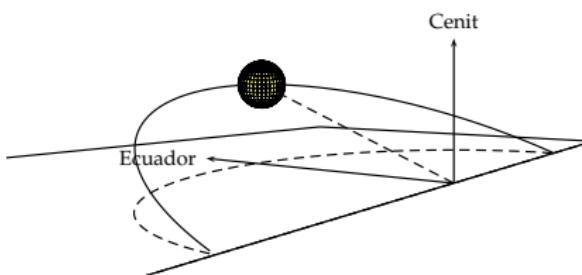
$$\cos(\omega_s) = -\tan(\delta) \tan(\phi)$$

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

Duración del día

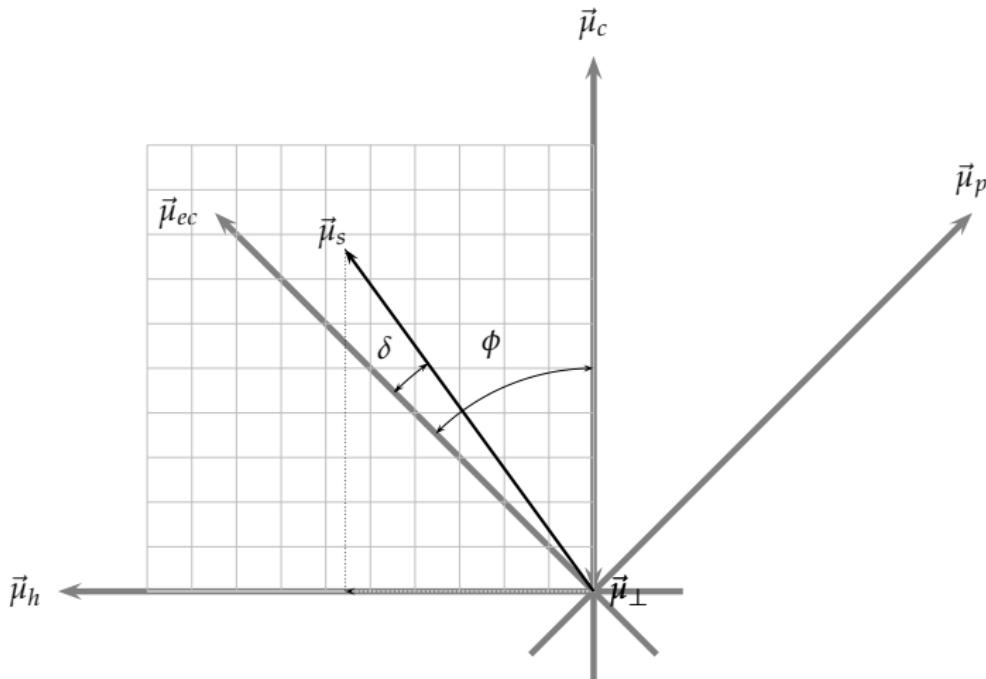


Ejes locales



- **Cenit Solar**, θ_{zs} : ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- **Azimut Solar**, ψ_s : ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- Dependen de d_n , ω , y ϕ .

Relación entre sistemas de coordenadas

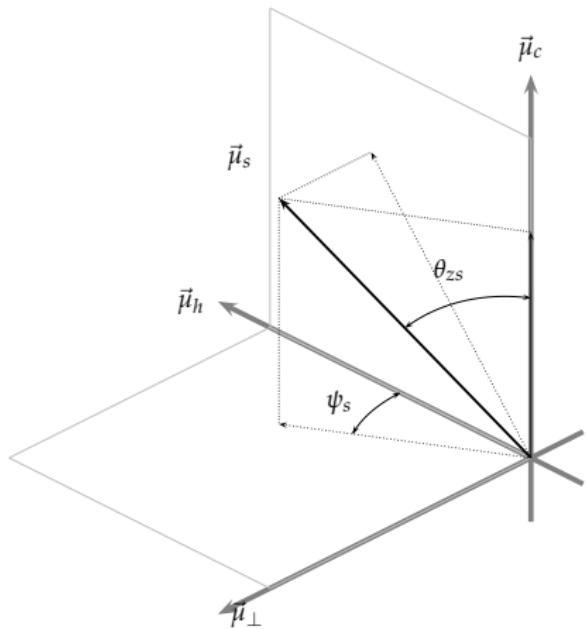


- **Latitud (ϕ) con signo:** Positivo para Hemisferio Norte, Negativo para Hemisferio Sur.

Cenit Solar

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

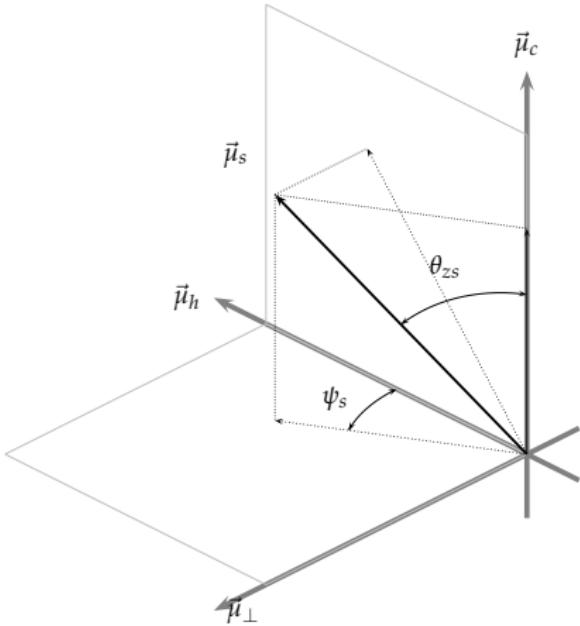
- θ_{zs} : **ángulo cenital**, ángulo entre el Sol y el cenit (vertical en un lugar determinado).
- γ_s , **ángulo altura solar**, ángulo complementario de θ_{zs} .
- Dependen de d_n , ω , y ϕ .



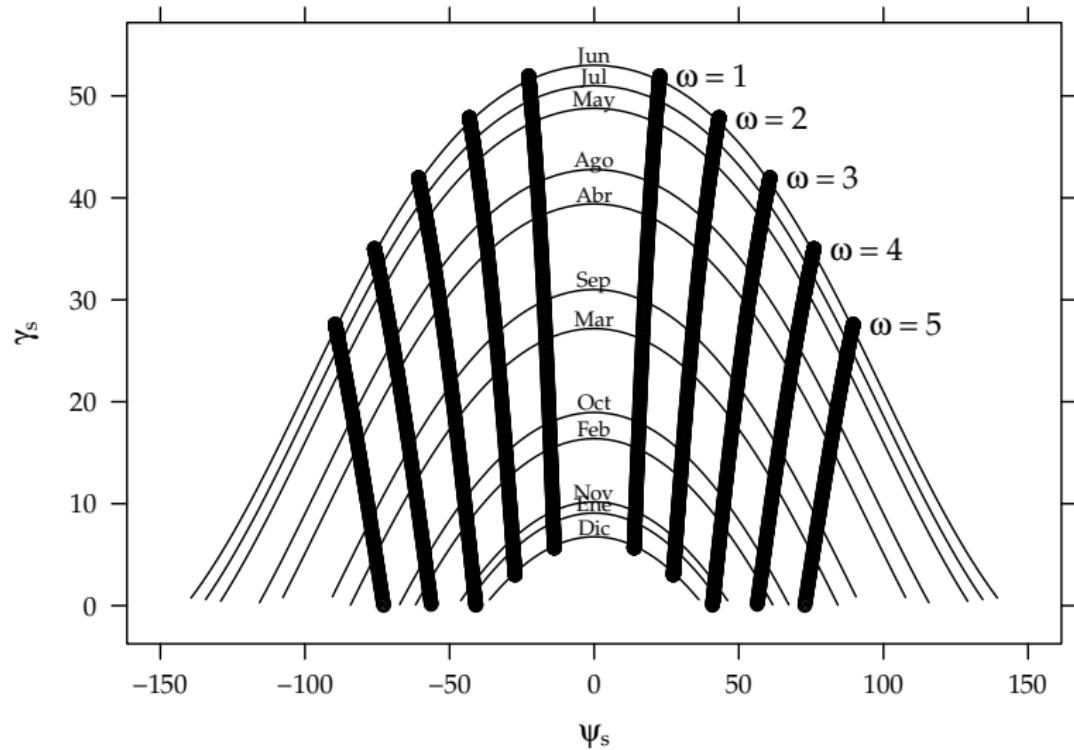
Azimut solar

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

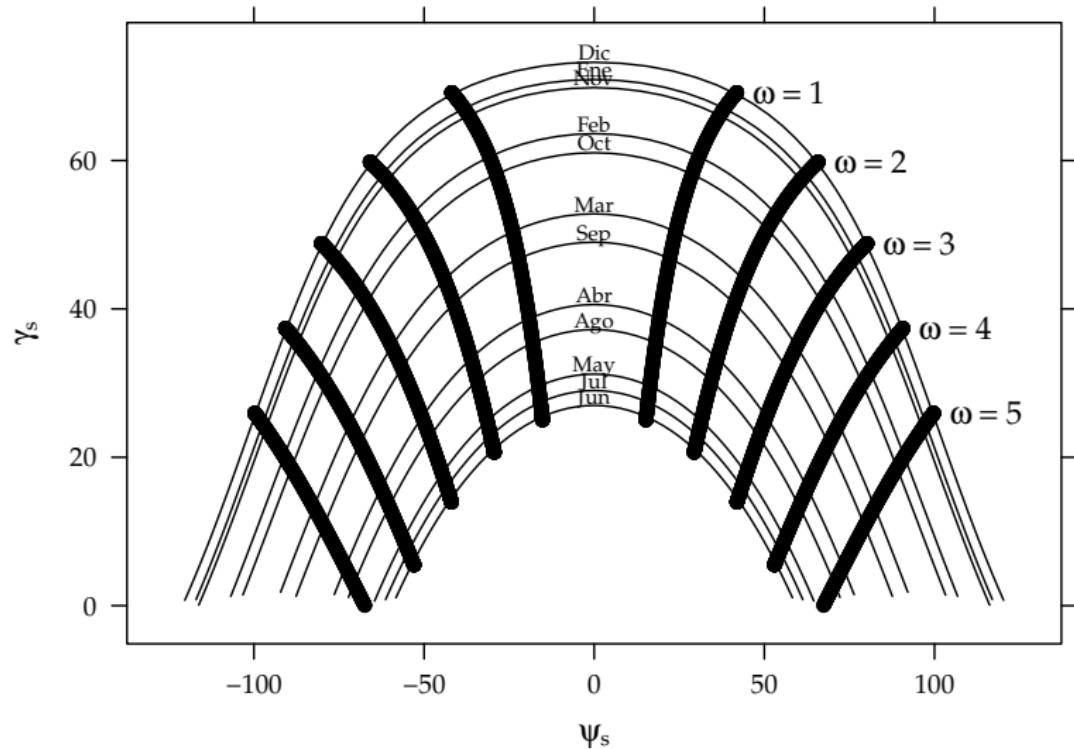
- ψ_s : **azimut solar**, ángulo entre el mediodía solar y la proyección del sol en el plano horizontal.
- Depende de d_n , ω , y ϕ .
- Criterio de Signos: negativo antes del mediodía.



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



Trayectoria Solar (40°S)



1 Introducción

2 Geometría Sol y Tierra

- Movimiento Sol-Tierra
- Ángulos Solares
- Hora solar y oficial

3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5 Bases de Datos

6 Radiación Solar en Generadores FV

Hora solar

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

- ω : 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°E.
- **Longitudes positivas** al **este del meridiano de Greenwich**.
- **Corrección:** $\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H$, con λ_L la longitud local y λ_H la longitud del huso horario. *$\Delta\lambda$ es positiva cuando la localidad está situada al este de su huso horario.*

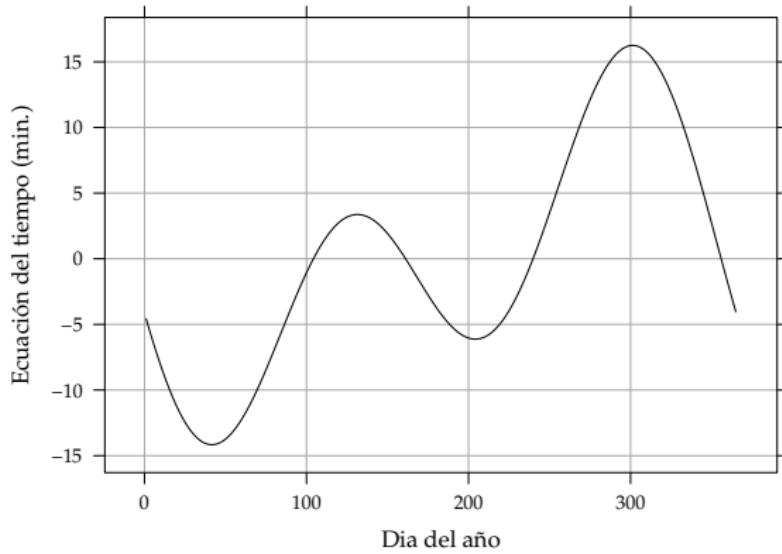
Tiempo solar medio

- **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

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

Calcule la hora solar real correspondiente al día 23 de Abril de 2010 (EoT = 1,78 min) 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°W y su hora oficial está regida por el huso horario GMT+1.

Solución

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

- $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.

Solución

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

- $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.

Solución

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

- $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78 \text{ min}$.

Solución

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

- $\lambda_L = -8,38^\circ$, $\lambda_H = 15^\circ$ y $\Delta\lambda = -23,38^\circ$.
- En España se aplica el horario de verano y este día está incluido en el período afectado, $\text{AO} = 1$.
- Por último, para este día $\text{EoT} = 1,78$ min.
- Así $\omega = -37,94^\circ$ (aproximadamente las 9 y media de la mañana). El Sol culminará ($\omega = 0$) cuando sean las 14:31, hora oficial.

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

Definiciones

- θ_s , **ángulo de incidencia (AOI)**, ángulo entre los rayos solares y la perpendicular al plano del generador.
- α : **orientación del generador** (0° cuando está orientado al mediodía solar)
- β : **inclinación del generador** (respecto de la superficie horizontal)

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
 - Sistema Estático
 - Sistemas con seguimiento
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

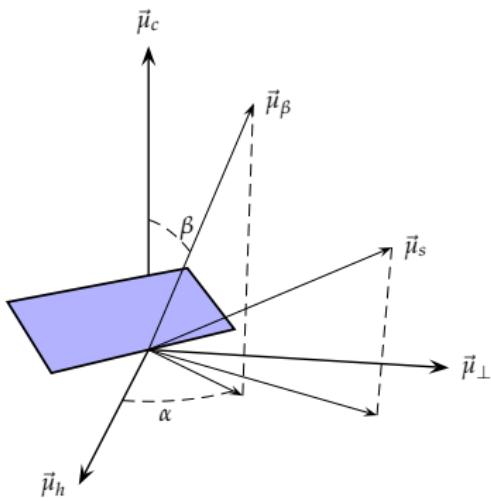
Sistema Estático



Ángulo de Incidencia

- Si $\alpha = 0$

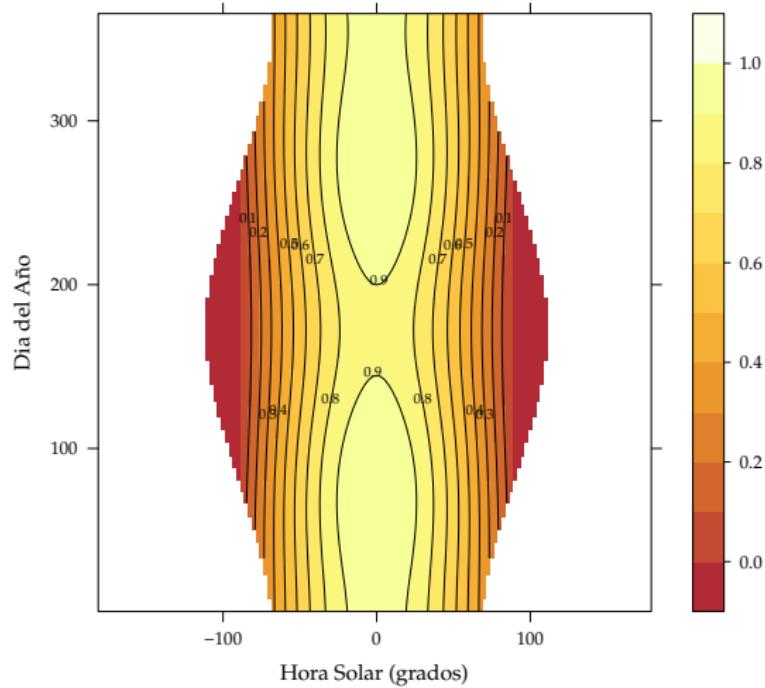
$$\cos(\theta_s) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\beta - |\phi|) - \text{sign}(\phi) \cdot \sin(\delta) \sin(\beta - |\phi|)$$



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

Ángulo de Incidencia

- $40^{\circ}N$



- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
 - Sistema Estático
 - Sistemas con seguimiento
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

Introducción

- **Fundamento:**

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

Introducción

- **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**

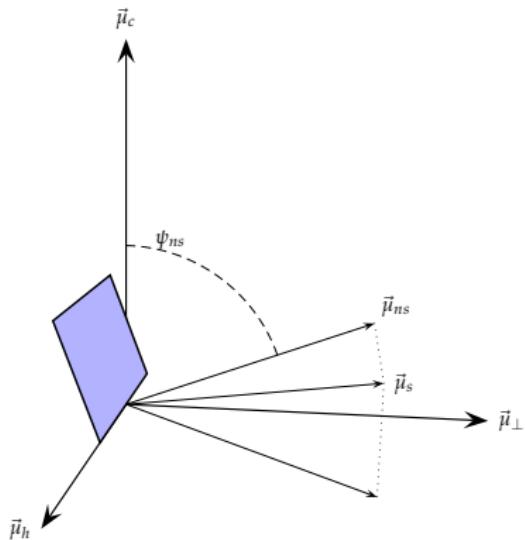
- ▶ Sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios),
- ▶ Facilidad de motorización,
- ▶ Buen aprovechamiento del terreno.

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



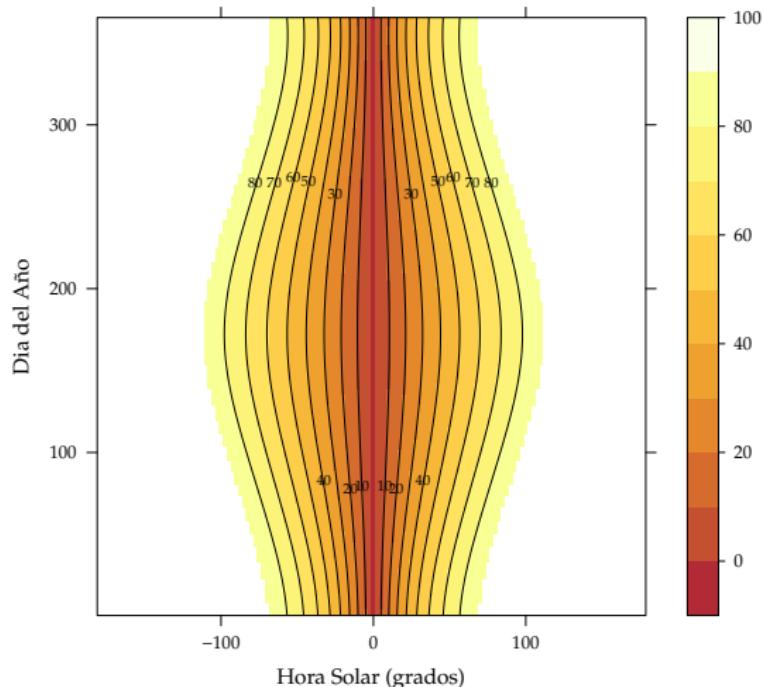
Ángulo de Incidencia (1x eje, horizontal N-S)

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



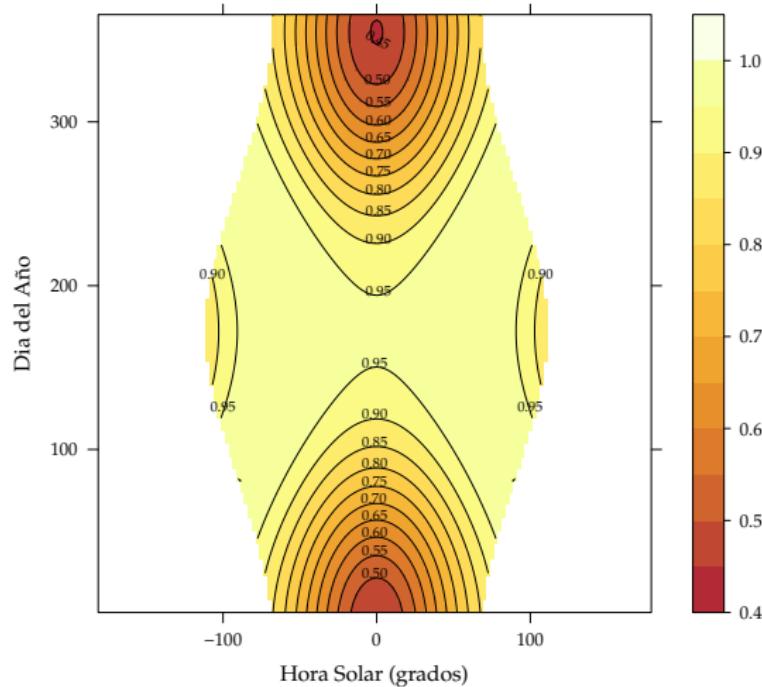
Inclinación de Eje Horizontal N-S

- $40^{\circ}N$



Ángulo de Incidencia de Eje Horizontal N-S

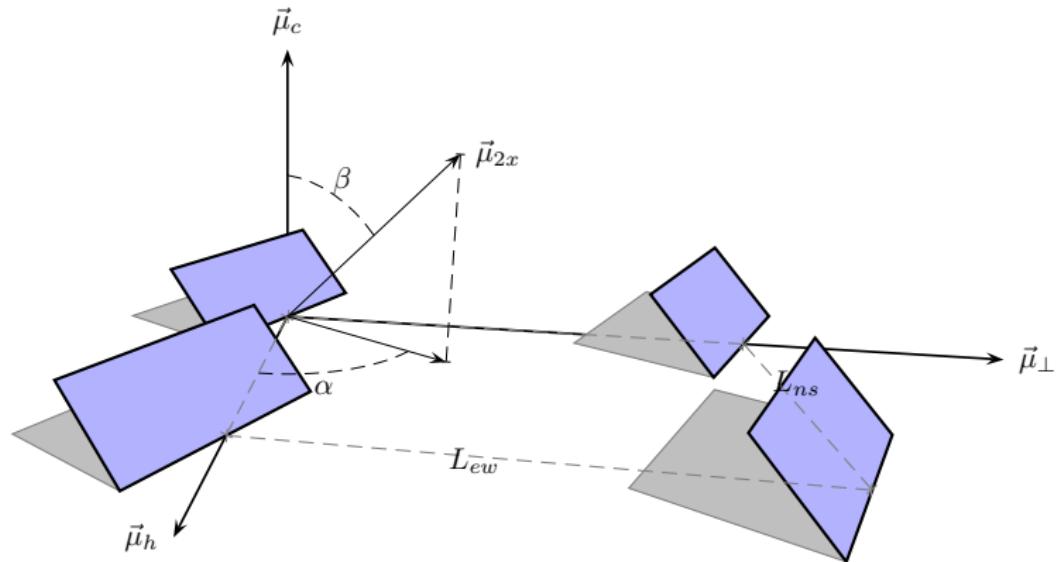
• $40^{\circ}N$



Sistema de Seguimiento (2x ejes)



Ángulo de Incidencia (seguidor 2x)



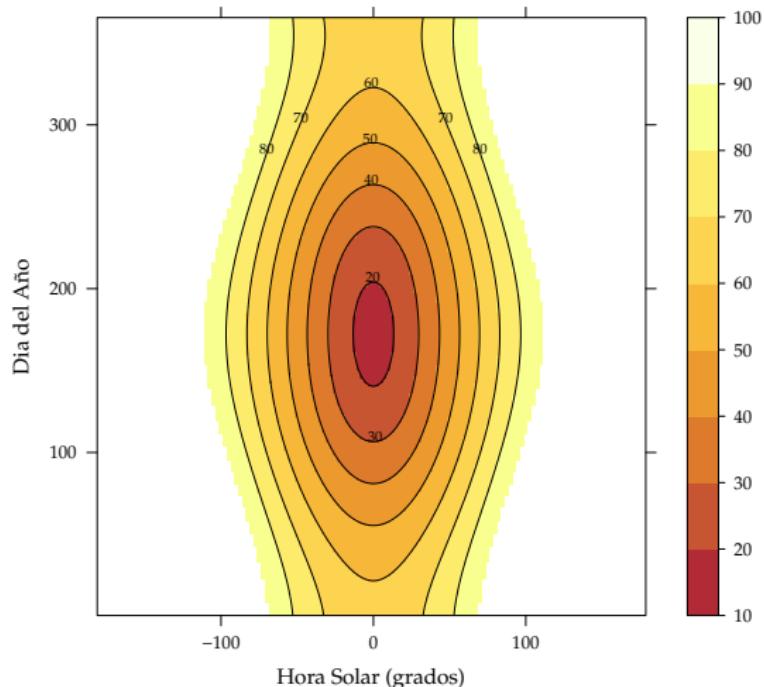
$$\beta = \theta_z$$

$$\alpha = \psi_s$$

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

Inclinación (seguidor 2x)

- $40^{\circ}N$



- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

Irradiancia e Irradiación

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

- Unidades: W m^{-2} , kW m^{-2}

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

- Unidades: Wh m^{-2} , kWh m^{-2}

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
 - Radiación Extra-atmosférica
 - Radiación solar en la superficie terrestre
 - Cálculo de componentes de radiación solar
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

Definición y Ecuaciones

- 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 límite superior de la atmósfera terrestre)
- **Irradiancia extra-atmosférica**

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

- **Irradiación extra-atmosférica diaria** (ω_s en radianes)

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

- Factor de corrección por excentricidad

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

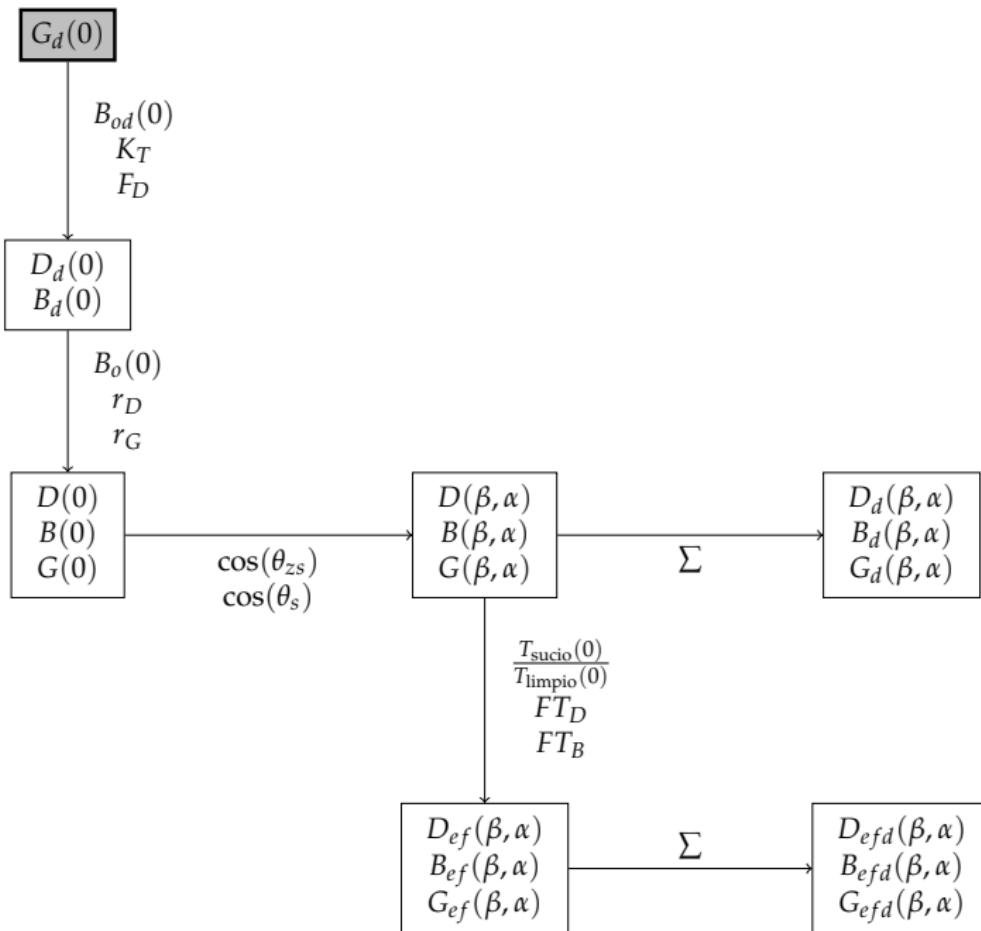
Días promedio

- 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

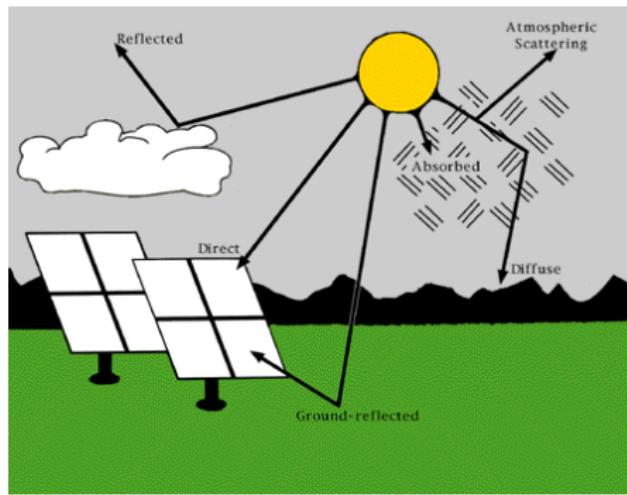
Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
d_n	199	230	261	292	322	347

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



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 CO₂)
- **Modificación de la distribución espacial** (dispersión por partículas)



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.**
- ▶ $K_{Tm} = \frac{G_{d,m}(0)}{B_{0d,m}(0)}$ (mensual)

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. $K_{Ta} = G_a/B_{0a} = \dots$

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: Irradiancia 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

$Forma_{tiempo,promedio}(lugar)$

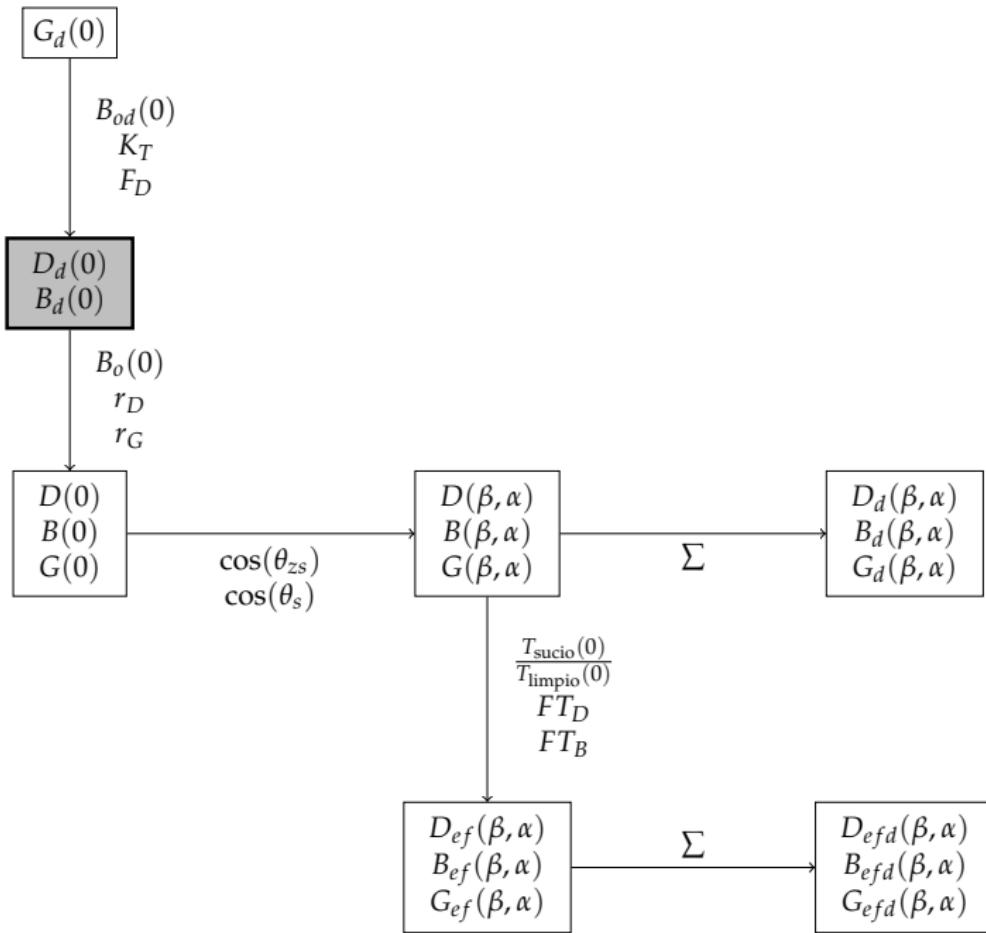
$G_{d,m}(0)$

$D_h(\alpha, \beta)$

$B_{0d}(n)$

$B(\beta)$

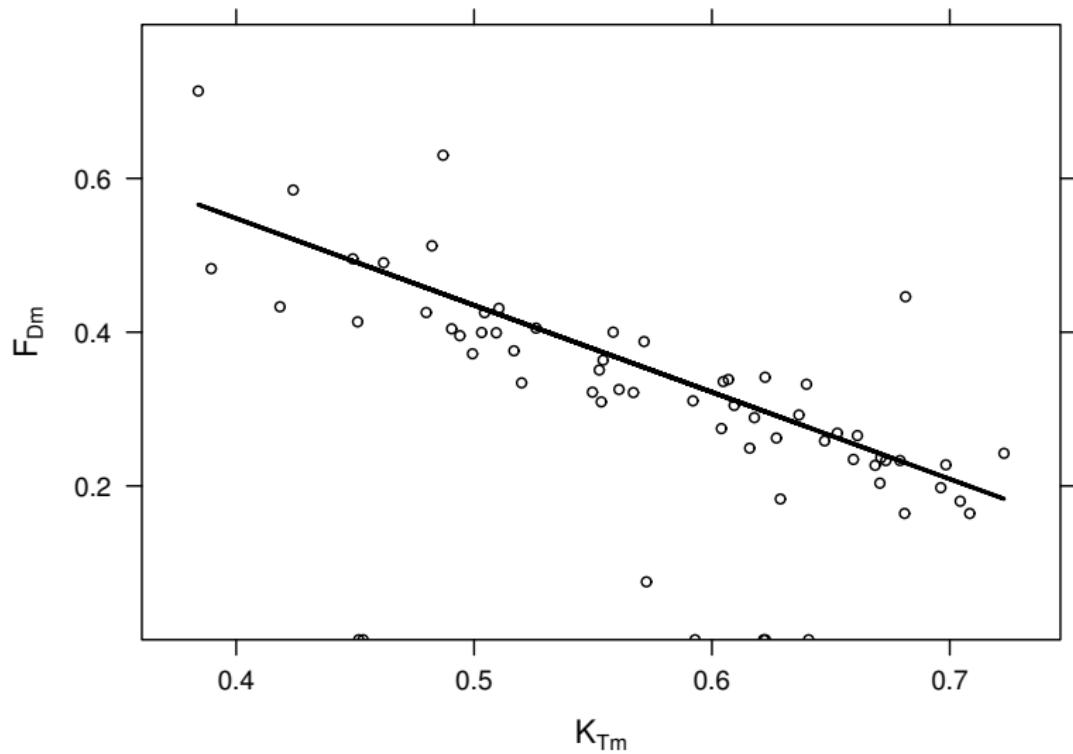
- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
 - Radiación Extra-atmosférica
 - Radiación solar en la superficie terrestre
 - Cálculo de componentes de radiación solar
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV



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)

Correlaciones F_D y K_T : Ecuación de Page

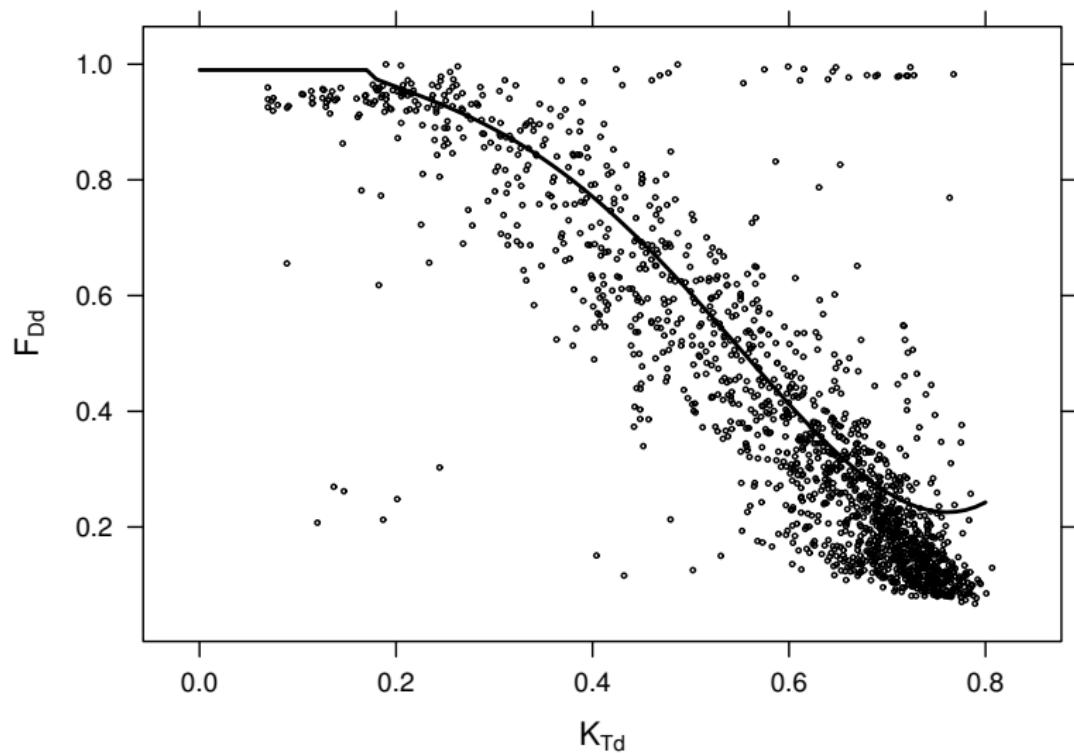


Correlaciones F_D y K_T

Ejemplo: en un lugar con $G_{d,m}(0) = 3150 \text{ Wh m}^{-2}$ en un mes con $B_{o,dm}(0) = 4320 \text{ Wh m}^{-2}$ será:

- $K_{Tm} = \frac{3150}{4320} = 0,73$
- Según la correlación de Page, $F_{Dm} = 1 - 1,13 \cdot 0,73 = 0,175$
- $D_{d,m}(0) = 0,175 \cdot 3150 = 551,6 \text{ Wh m}^{-2}$
- $B_{d,m}(0) = 3150 - 551,6 = 2598,4 \text{ Wh m}^{-2}$

Correlaciones F_D y K_T : Collares-Pereira y Rabl



Ejemplo

Calcular las componentes directa y difusa de la radiación solar del:

- Mes de Septiembre (día 261) en un lugar con latitud $\phi = 40^\circ\text{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}$.

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos**
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

1

Introducción

2

Geometría Sol y Tierra

3

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5

Bases de Datos

- Introducción
- Fuentes de Datos
- Control de Calidad

6

Radiación Solar en Generadores FV

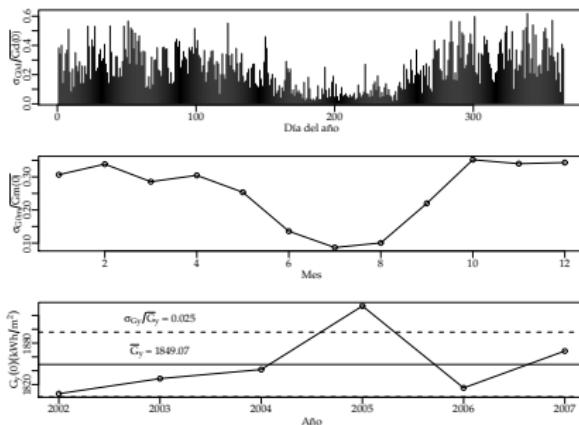
Variabilidad Solar

- 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

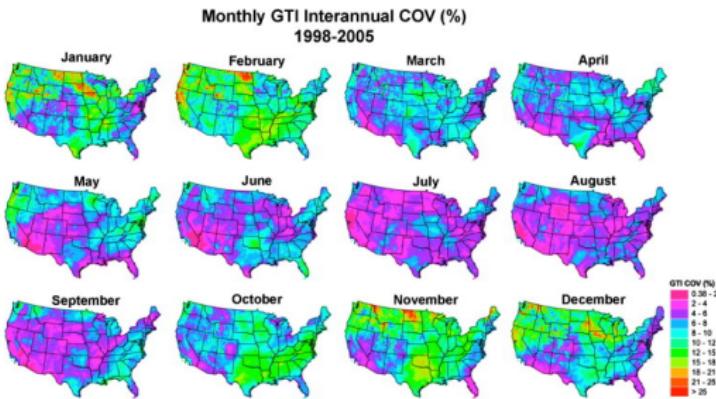
- Nos interesan **estimaciones a largo plazo** del funcionamiento de los sistemas FV en una localización concreta.
- Las fuentes de datos de radiación solar deben:
 - ▶ **capturar el comportamiento a largo plazo** (variabilidad interanual)
 - ▶ y ser **representativas de la localización** (variabilidad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

Requerimientos

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

- **Medidas Cercanas:** ≤ 10 km
- **Series Temporales Largas:** $\simeq 10$ años

1

Introducción

2

Geometría Sol y Tierra

3

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5

Bases de Datos

- Introducción
- **Fuentes de Datos**
- Control de Calidad

6

Radiación Solar en Generadores FV

Estaciones Meteorológicas

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

Piranómetro



Imágenes de Satelite

- Baja resolución temporal (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>

1

Introducción

2

Geometría Sol y Tierra

3

Geometría de los sistemas fotovoltaicos

4

Radiación Solar en la Superficie Terrestre

5

Bases de Datos

- Introducción
- Fuentes de Datos
- Control de Calidad

6

Radiación Solar en Generadores FV

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):

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

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

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

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 Error (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 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV

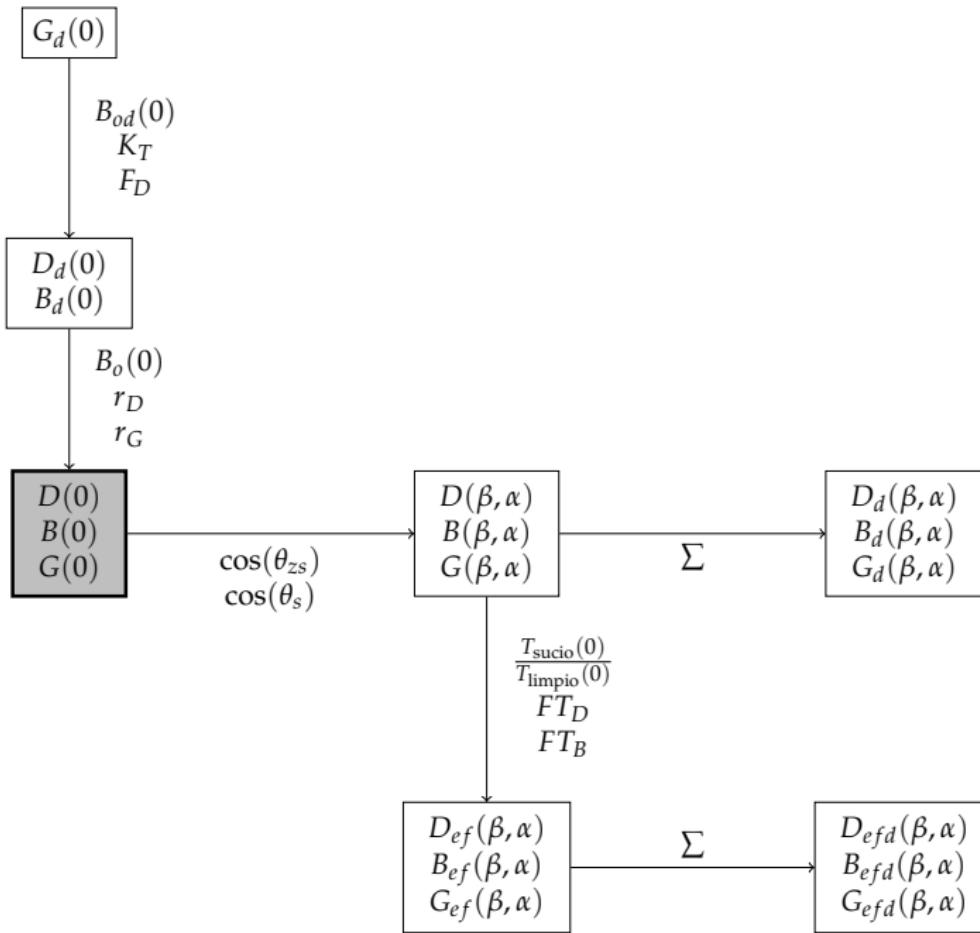
- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV
 - Introducción
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Pérdidas 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.



- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV
 - Introducción
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Pérdidas angulares y por suciedad
 - Radiación Efectiva según tipologías

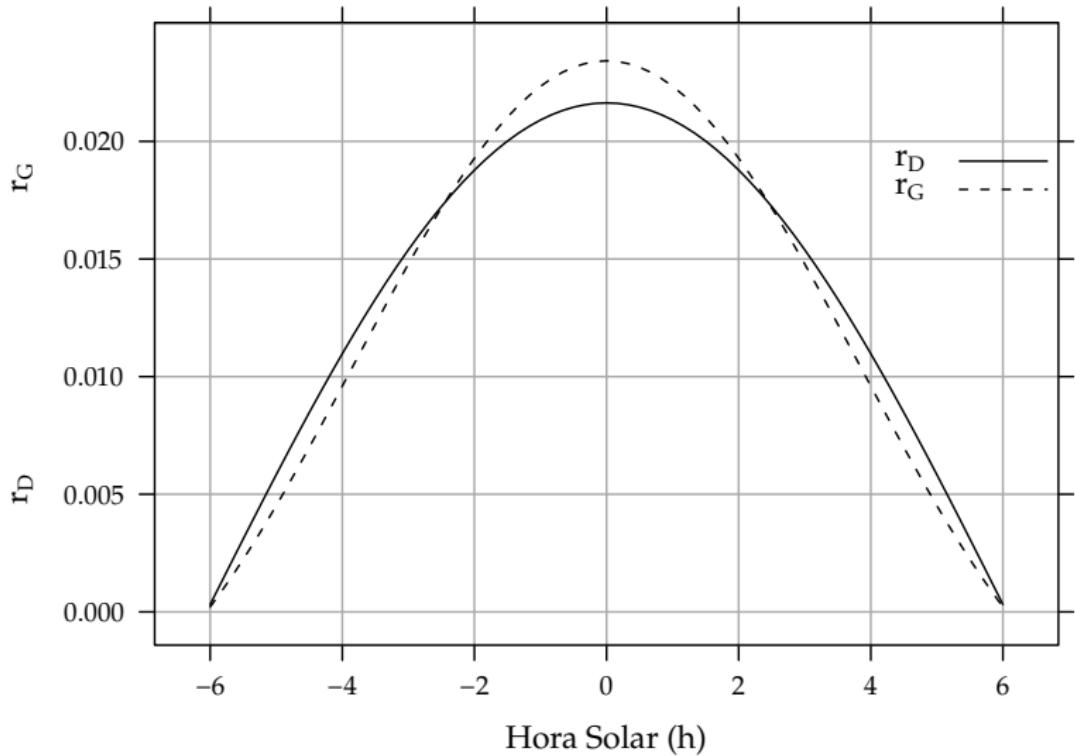


Planteamiento

- **Objetivo:** construir un perfil diario promedio de irradiancia global e irradiancia difusa (*cielo claro*)
- **Puntos clave:**
 - ▶ La variación solar durante una hora es baja: irradiación horaria equivale al valor medio de la irradiancia durante esa hora.
 - ▶ Relación entre irradiancia e irradiación extra-terrestre deducible teóricamente:

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

Perfil



Ecuaciones del perfil

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

$$r_G = \frac{G(0)}{G_d(0)} = r_D \cdot (a + b \cdot \cos(\omega))$$

$$a = 0,409 - 0,5016 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

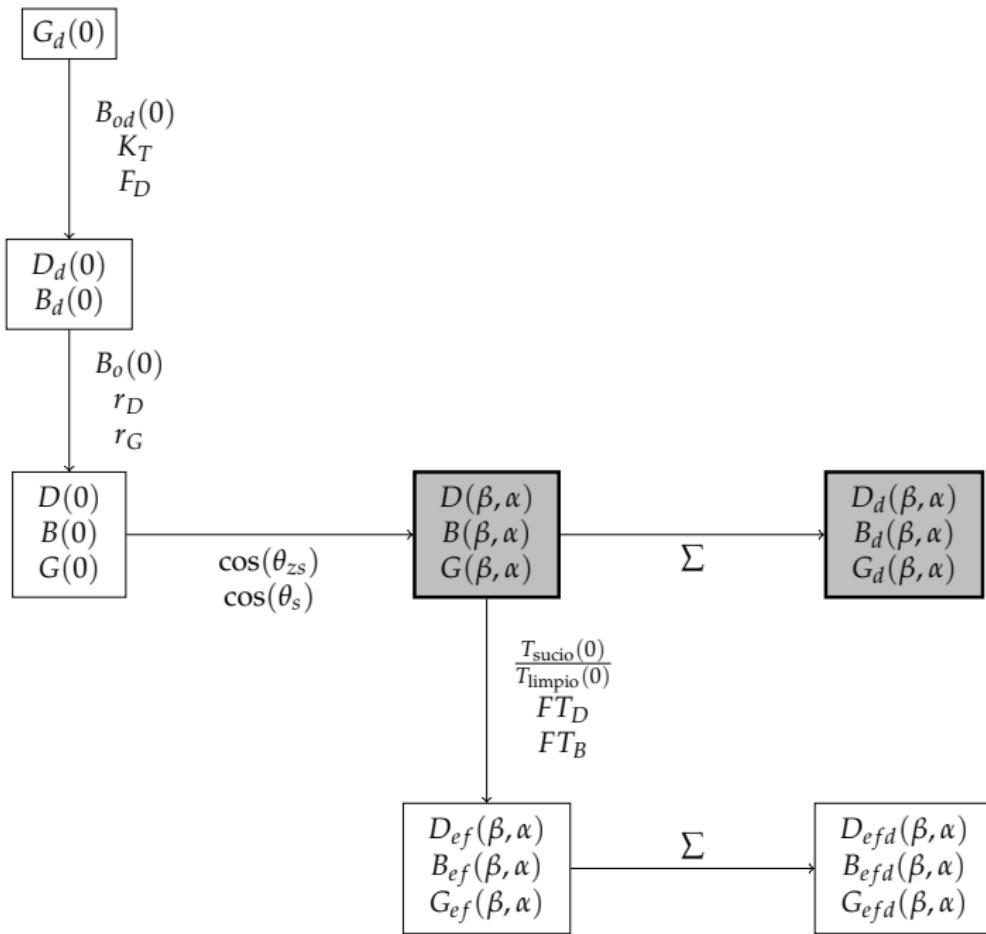
$$b = 0,6609 + 0,4767 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

Ejercicio

Calcular 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 $G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}$.

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV
 - Introducción
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador**
 - Pérdidas angulares y por suciedad
 - Radiación Efectiva según tipologías



Planteamiento

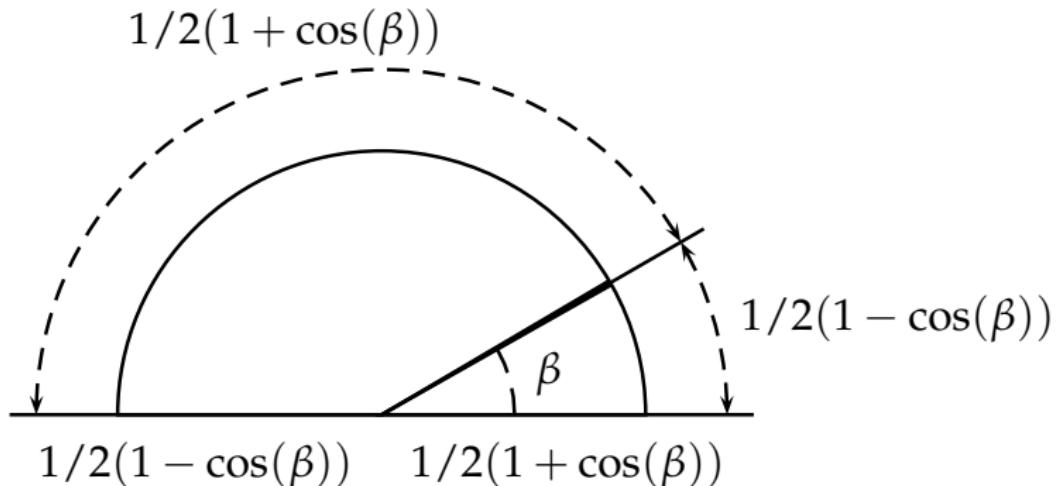
- **Irradiancia Directa:** ecuación analítica basada en geometría solar (ángulo cenital) y del generador (ángulo de incidencia).
- **Irradiancia Difusa:** modelos del estado de cielo, modelo isotrópico o anisotrópico.
- **Irradiancia de Albedo:** modelo isotrópico con coeficiente de reflexión típico.

Irradiancia Directa

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

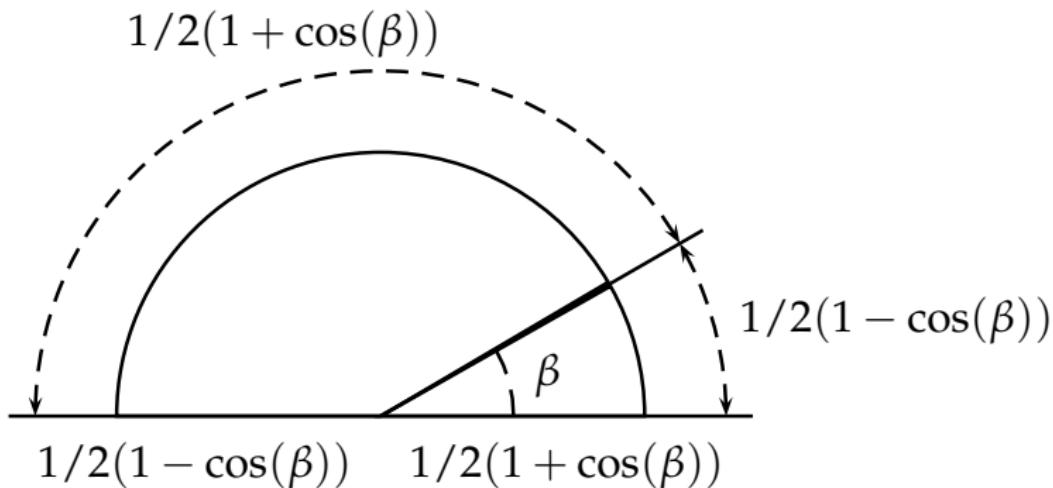
$$B(\beta, \alpha) = B(0) \cdot \frac{\max(0, \cos(\theta_s))}{\cos(\theta_{zs})}$$

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

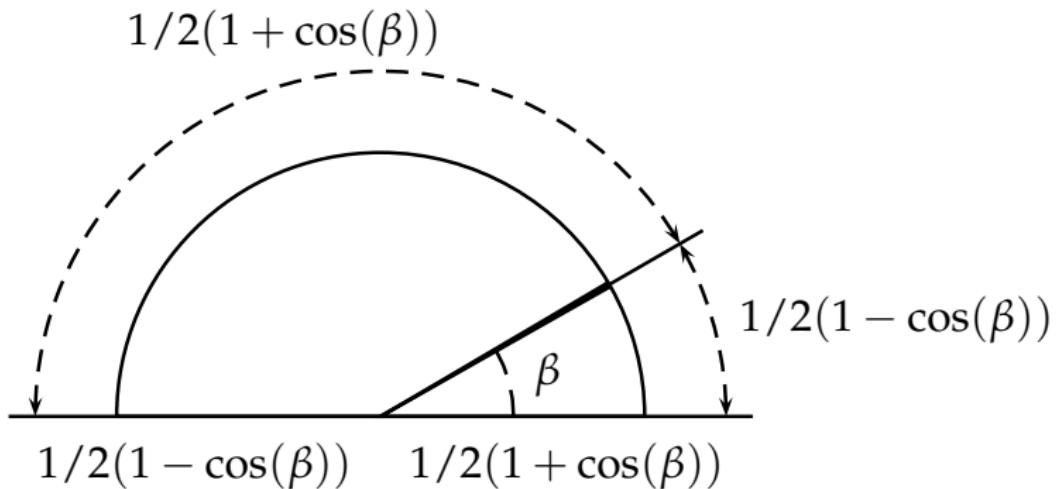
$$D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha)$$

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

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

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

Irradiancia de Albedo



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

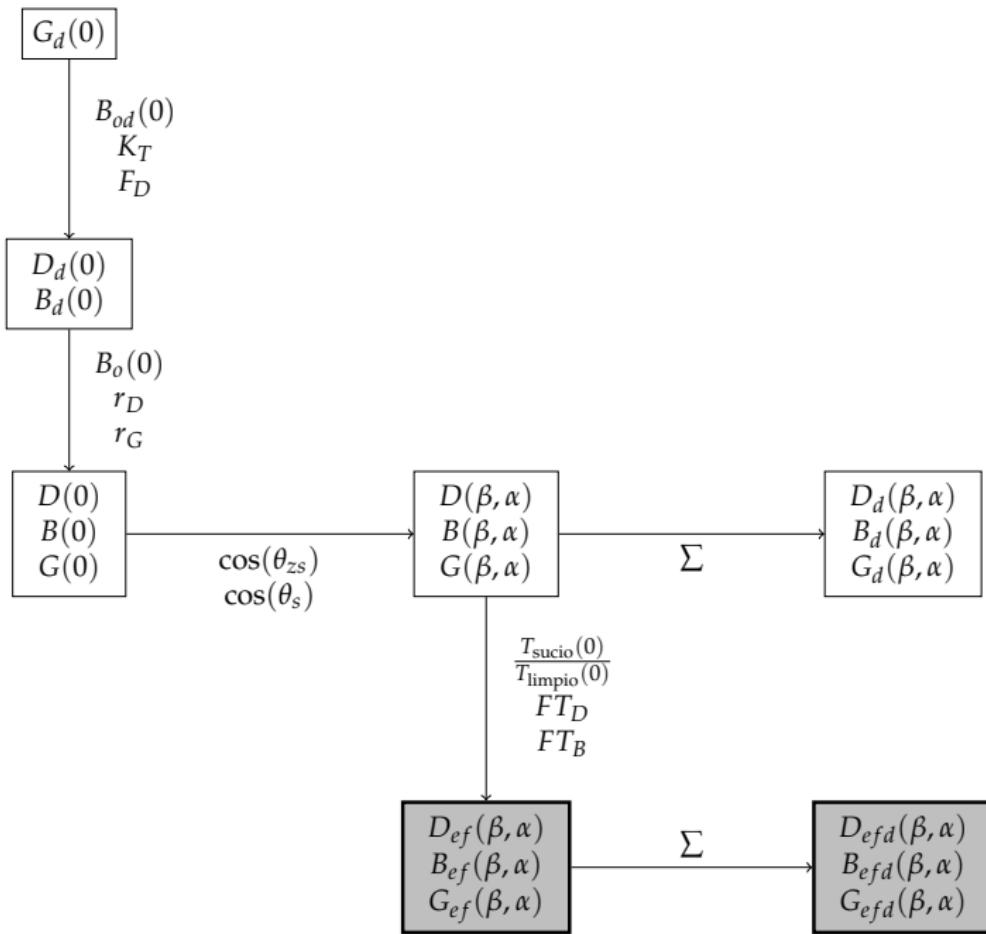
$$\rho = 0,2$$

Ejercicio

Calcular la irradiancia difusa, directa, de albedo y global, en

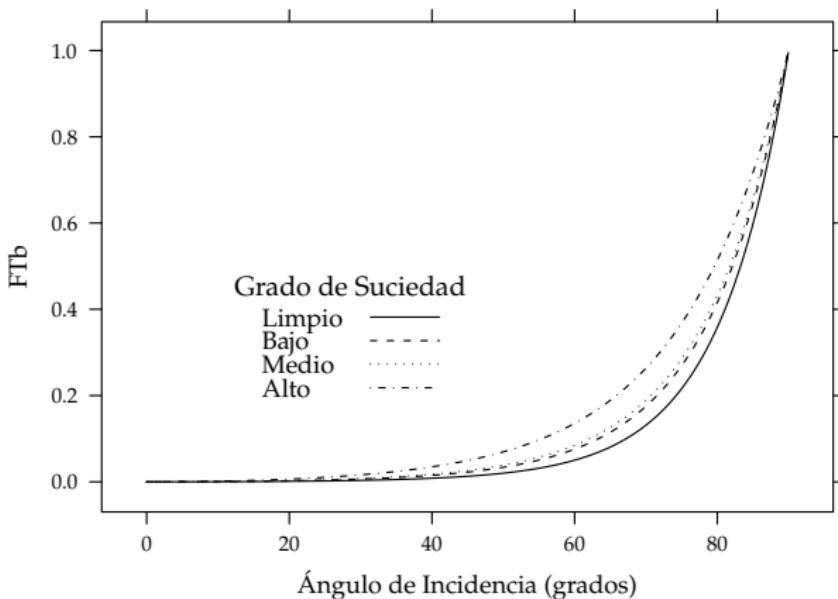
- Un generador inclinado 30° y orientado al Sur, 2 horas antes del mediodía del día 261 en un lugar con latitud $\phi = 40^\circ\text{N}$ y con media mensual de irradiación global diaria horizontal $G_{d,m}(0) = 2700 \text{ Wh m}^{-2}$.

- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV
 - Introducción
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Pérdidas angulares y por suciedad
 - Radiación Efectiva según tipologías



Radiación directa

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



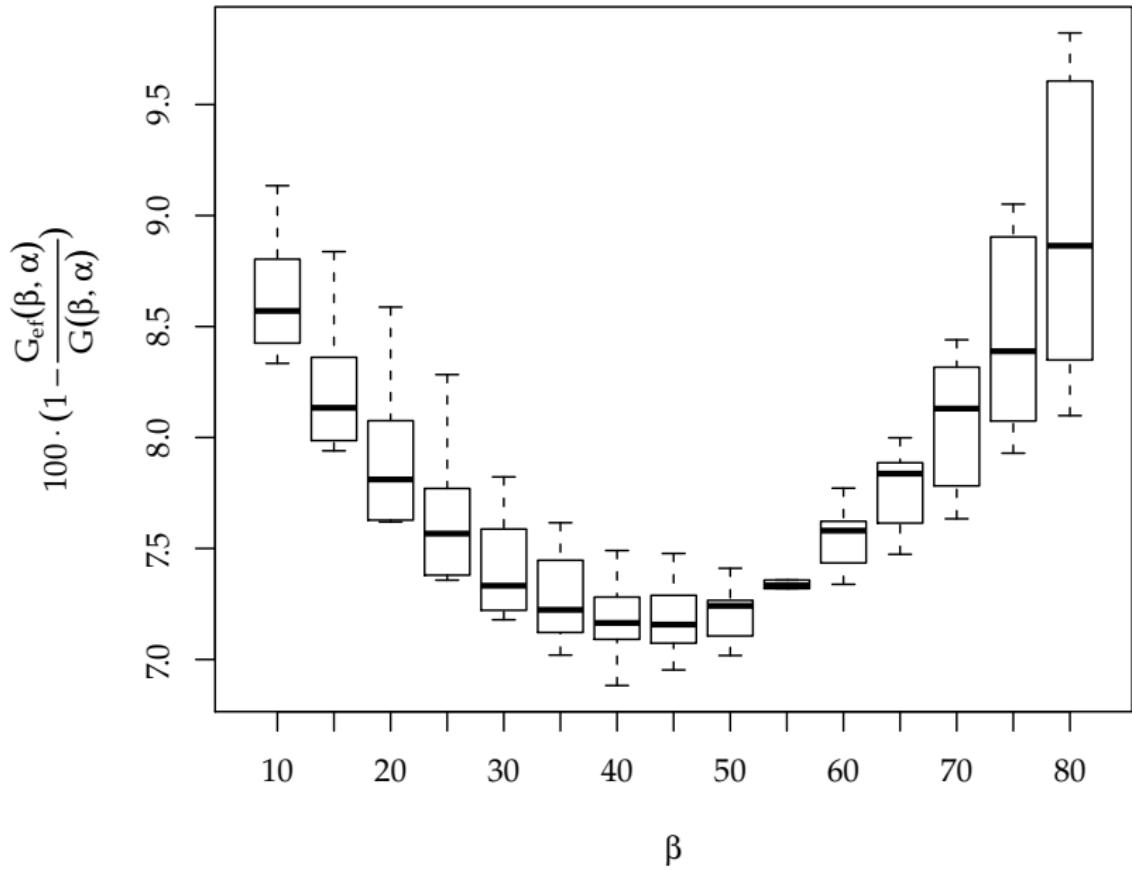
Difusa y Albedo

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

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

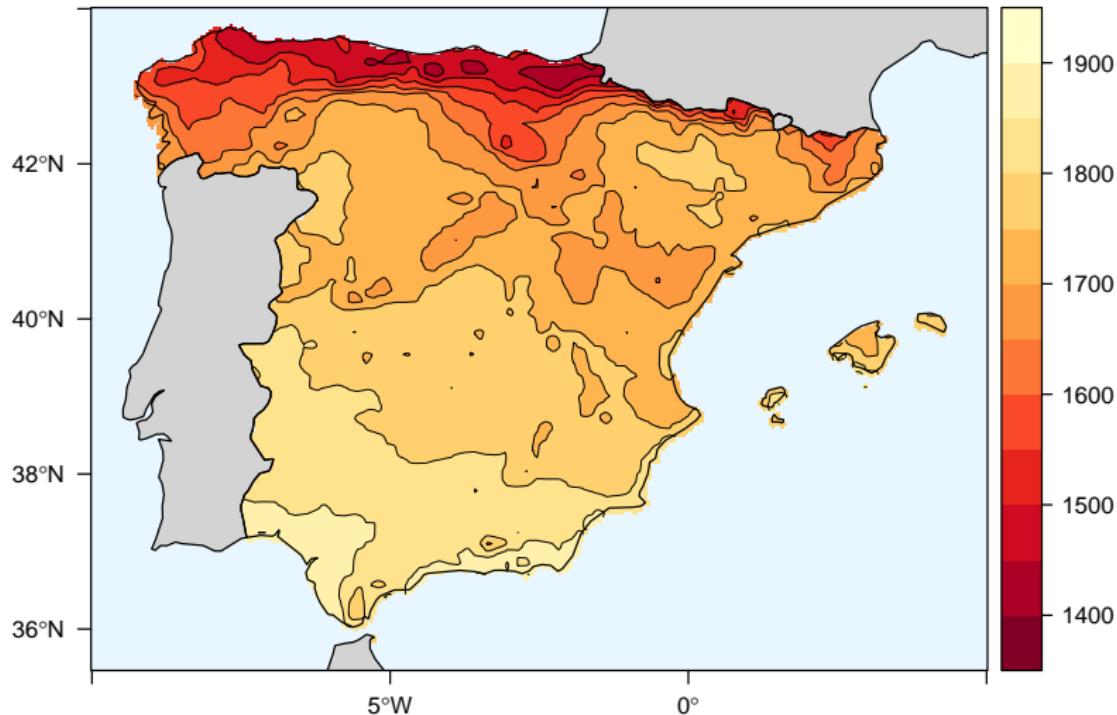
$$R_{ef}(\beta, \alpha) = R(\beta, \alpha) \cdot \left[\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \right] \cdot (1 - FT_R(\beta))$$

Pérdidas anuales

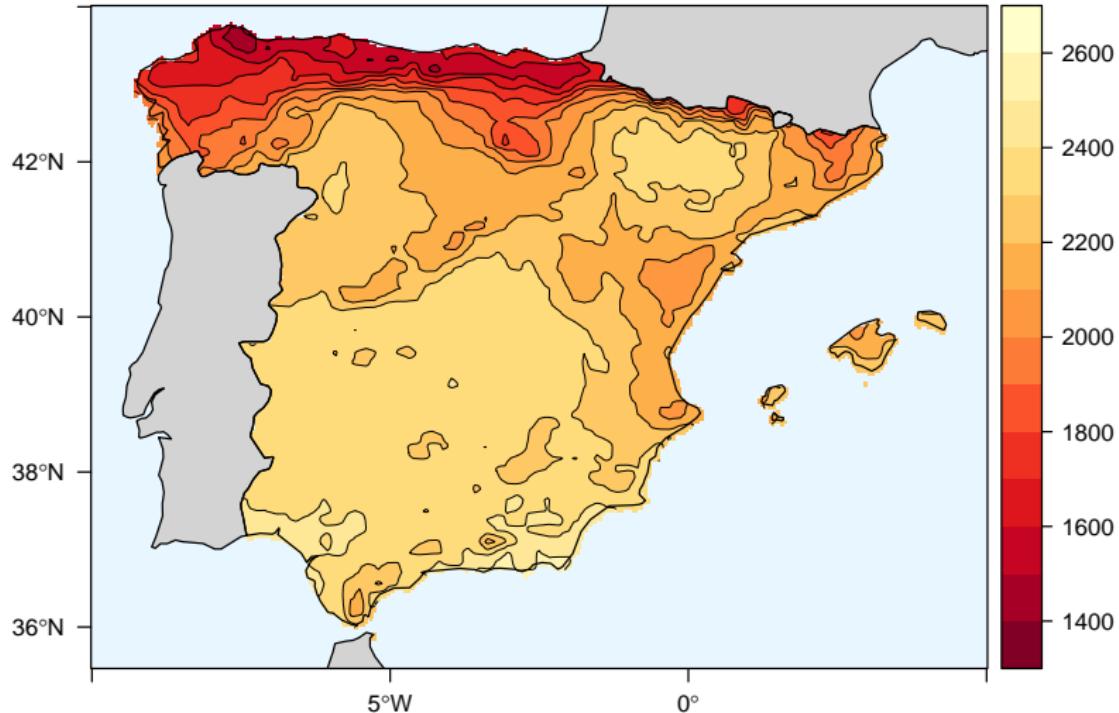


- 1 Introducción
- 2 Geometría Sol y Tierra
- 3 Geometría de los sistemas fotovoltaicos
- 4 Radiación Solar en la Superficie Terrestre
- 5 Bases de Datos
- 6 Radiación Solar en Generadores FV
 - Introducción
 - Irradiancia a partir de irradiación diaria
 - Transformación al plano del generador
 - Pérdidas angulares y por suciedad
 - Radiación Efectiva según tipologías

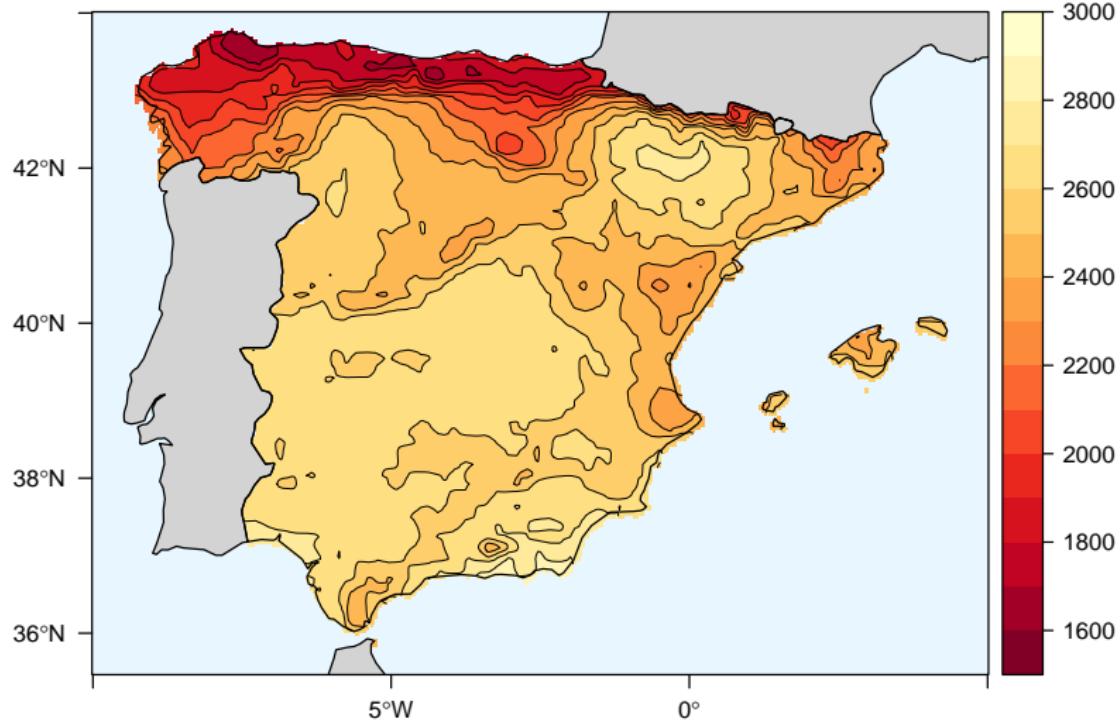
Radiación en Sistema estático



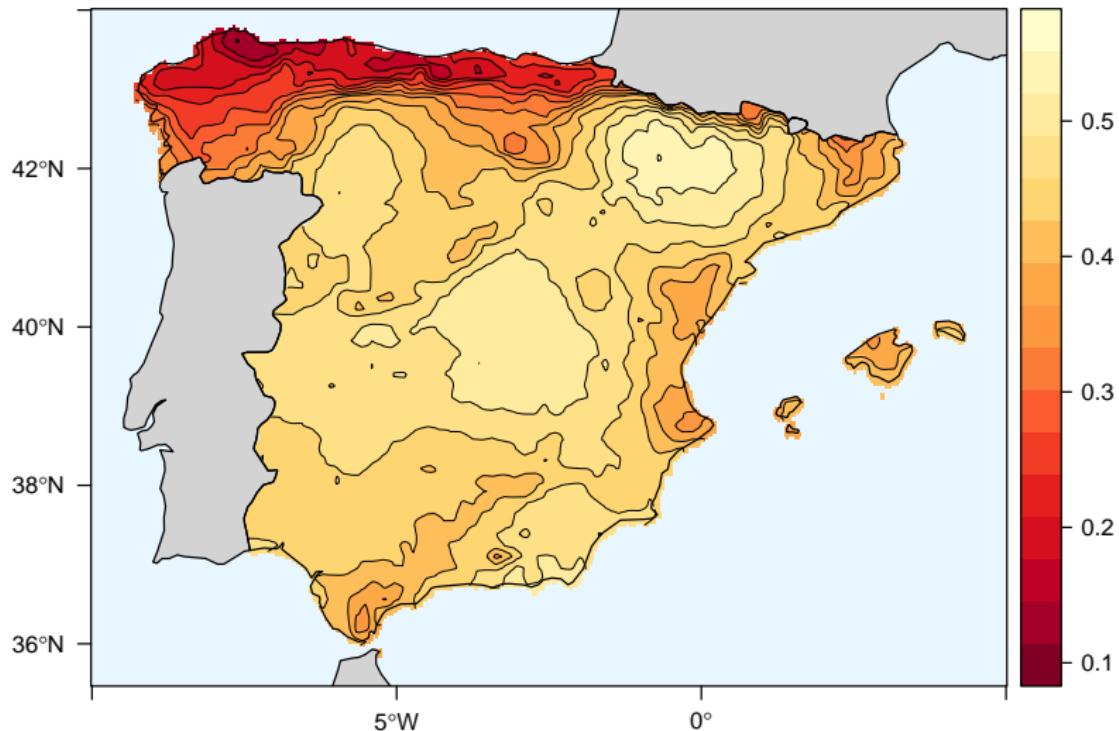
Radiación en Seguimiento Eje Horizontal



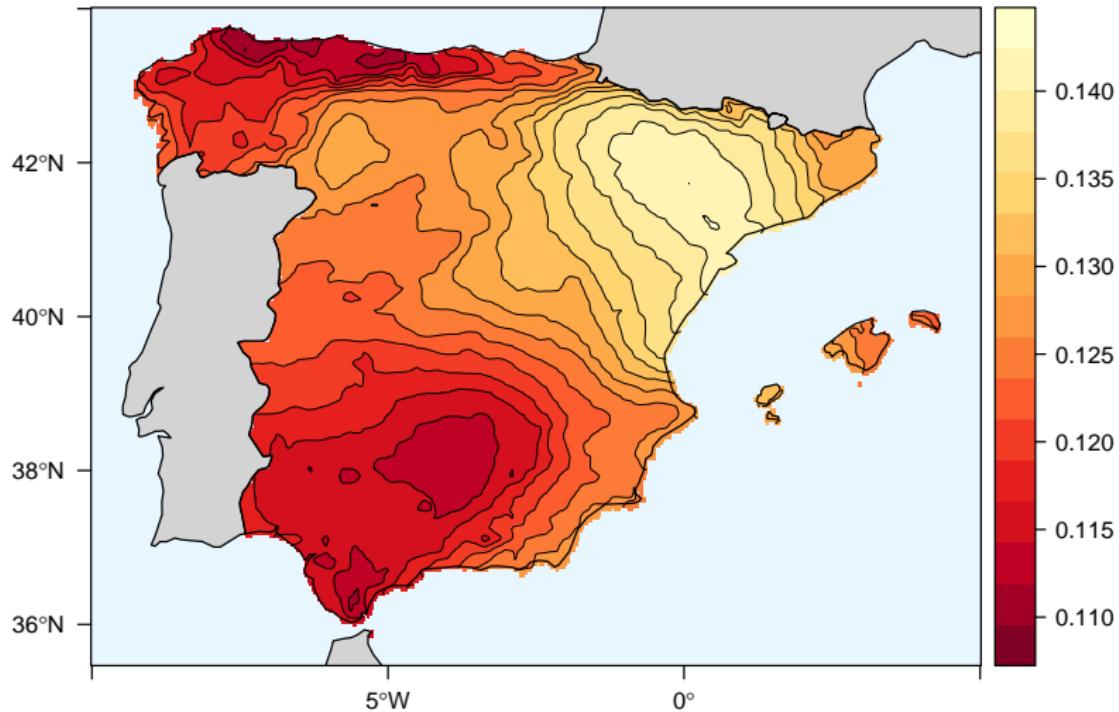
Radiación en Seguimiento Doble Eje



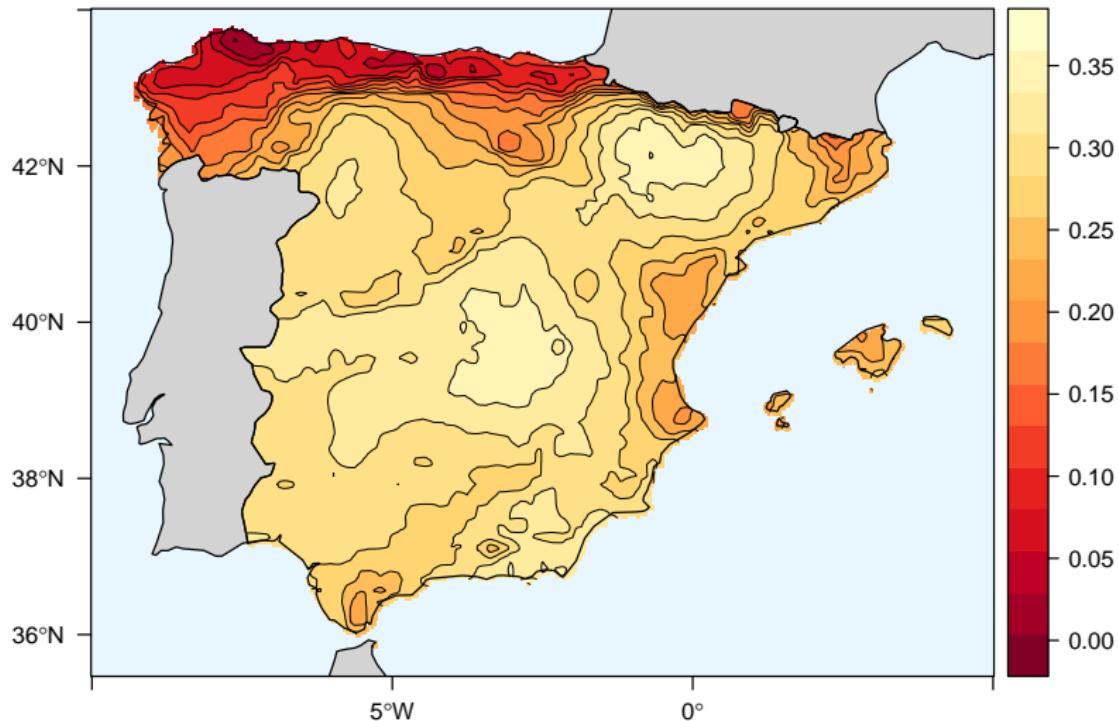
Comparación Doble Eje-Estática



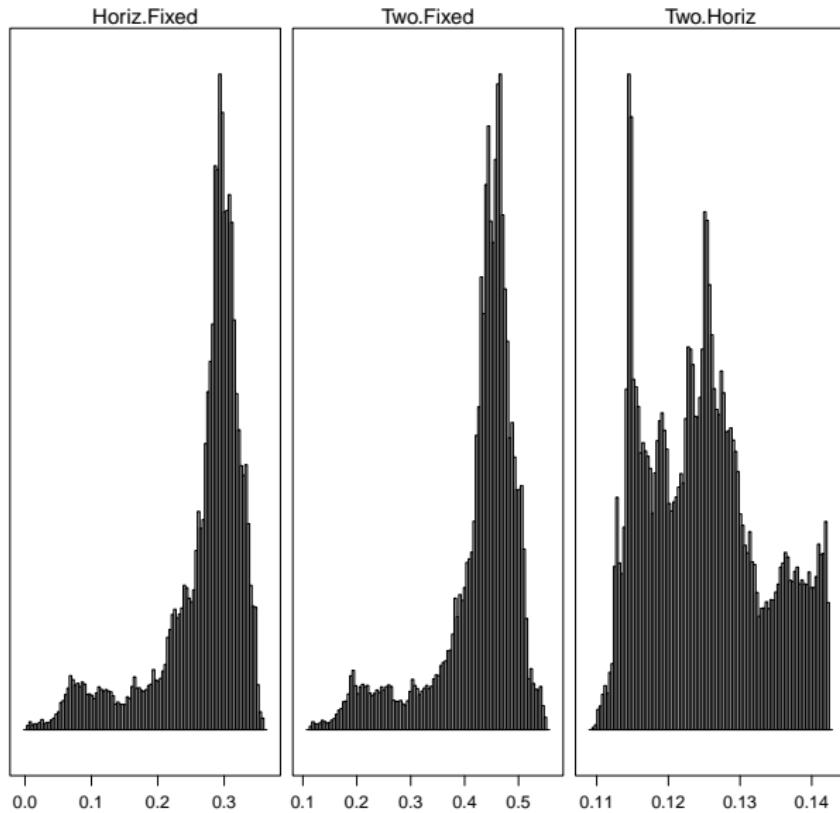
Comparación Doble Eje - Horizontal



Comparación Eje Horizontal - Estática



Comparación entre Sistemas



Comparación entre Sistemas

