

Energía Solar Fotovoltaica: Radiación Solar

Oscar Perpiñán Lamigueiro
<http://oscarperpinan.github.io>

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia e Irradiación

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

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

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

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Radiación Extra-atmosférica

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

- ▶ La radiación que alcanza la superficie de la atmósfera es radiación directa del Sol.
- ▶ **Constante solar** $B_0 = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (irradiancia solar sobre la superficie normal al vector solar en límite superior de la atmósfera terrestre)
- ▶ **Irradiancia extra-atmosférica**
 - ▶ $B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_{zs}$
 - ▶ $B_{0d}(0) = -\frac{T}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$
(ω_s en radianes)

Radiación Extra-atmosférica

- ▶ Es posible demostrar que el **promedio mensual** de esta irradiación diaria **coincide numéricamente** 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

Interacción de la radiación con la atmósfera

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

- ▶ **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)
 - ▶ Difusión de Rayleigh (longitud de onda mucho mayor que tamaño de partícula) - Capas altas - Color Azul
 - ▶ Difusión de Mie (longitud de onda de magnitud similar a tamaño de partícula) - Capas bajas
 - ▶ Difusión no selectiva (longitud de onda mucho menor que tamaño de partícula)

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Componentes de la radiación solar

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

► Radiación Directa. (B)

- Línea recta con el Sol.

Naturaleza de la
radiación solar

► Radiación Difusa. (D)

- Procedente de todo el cielo salvo el Sol
- Rayos dispersados por la atmósfera.
- Anisotrópica, proceso estocástico.

Cálculo de
componentes de
radiación solar

► Radiación del albedo. (R, AL)

- Procedente del suelo (reflejada)

Radiación Efectiva
según tipologías

► Radiación Global: $G = B + D + R$

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Cómo se escribe

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Forma, tiempo, lugar

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

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

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

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Cómo se escribe

Forma, tiempo, lugar

Forma_{tiempo,promedio}(lugar)

$G_{d,m}(0)$

$D_h(\alpha, \beta)$

$B_{0d}(n)$

$B(\beta)$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Caracterización de la atmósfera

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

► 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 ($AM=1$)
- $AM = 1 / \cos \theta_{zs}$

► Índice de claridad

- Relación entre la radiación global en el plano horizontal y la radiación extra-atmosférica 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

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Radiación como proceso estocástico

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ La **distribución de valores** que presenta la radiación solar durante un periodo está **determinada por el valor promedio de la radiación durante ese periodo.**
 - ▶ Por ejemplo, conocer la media mensual de la radiación solar diaria en un determinado lugar permite saber cómo se comportará la radiación diaria durante ese mes
- ▶ El índice de claridad para un día concreto **sólo está influido** por el índice de claridad del **día anterior**.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estimación de Directa y Difusa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ 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)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Correlaciones F_D y K_T : Ecuación de Page

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

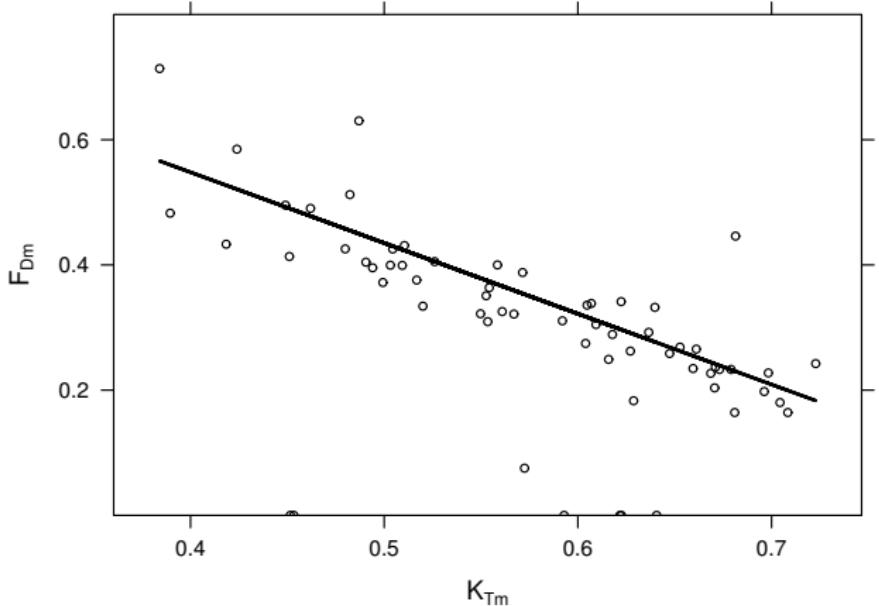
Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



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

Correlaciones F_D y K_T

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

- ▶ $K_{Tm} = \frac{3150}{4320} = 0.73$
- ▶ Según la correlación de Page,
 $F_{Dm} = 1 - 1.13 \cdot 0.73 = 0.175$
- ▶ $D_{d,m}(0) = 0.175 \cdot 3150 = 551,6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$
- ▶ $B_{d,m}(0) = 3150 - 551.6 = 2598,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$

Correlaciones F_D y K_T : Collares-Pereira y Rabl

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

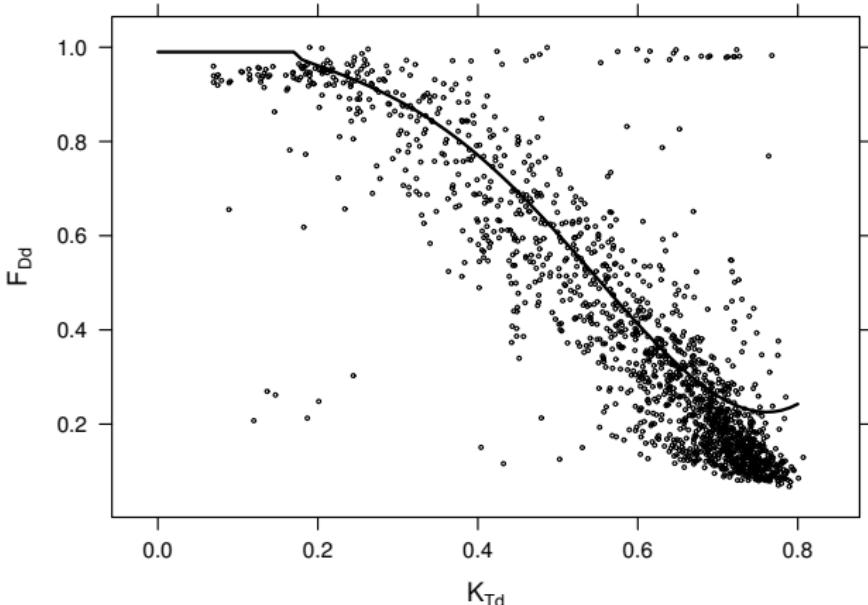
Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



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

Estimación de Directa y Difusa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

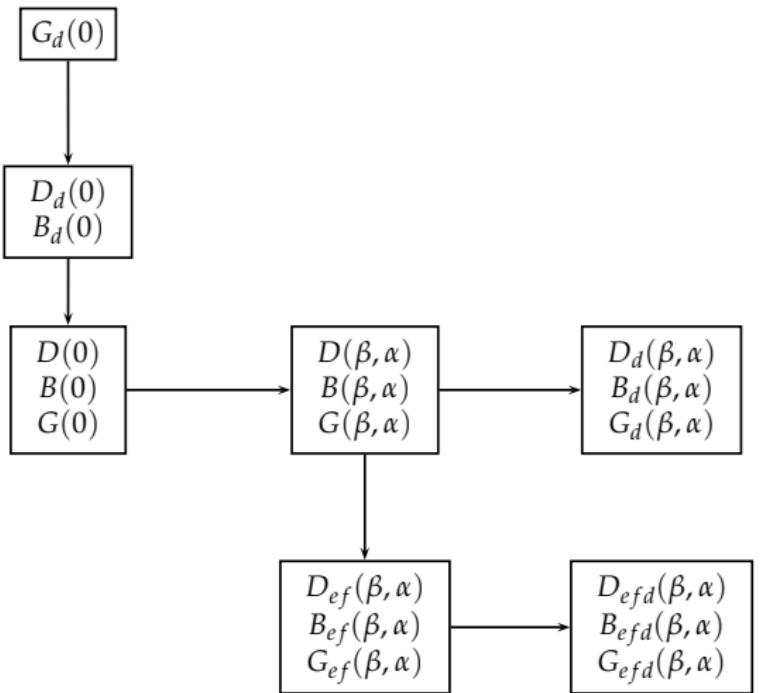
Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia sobre superficies arbitrarias

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ La irradiación durante una hora coincide con el valor medio de la irradiancia durante esa hora.
- ▶ La variación solar durante una hora es baja: valor de irradiancia equivalente a valor de irradiación.
- ▶ Relación entre irradiancia e irradiación extra-terrestre deducible teóricamente:

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
suciedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

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

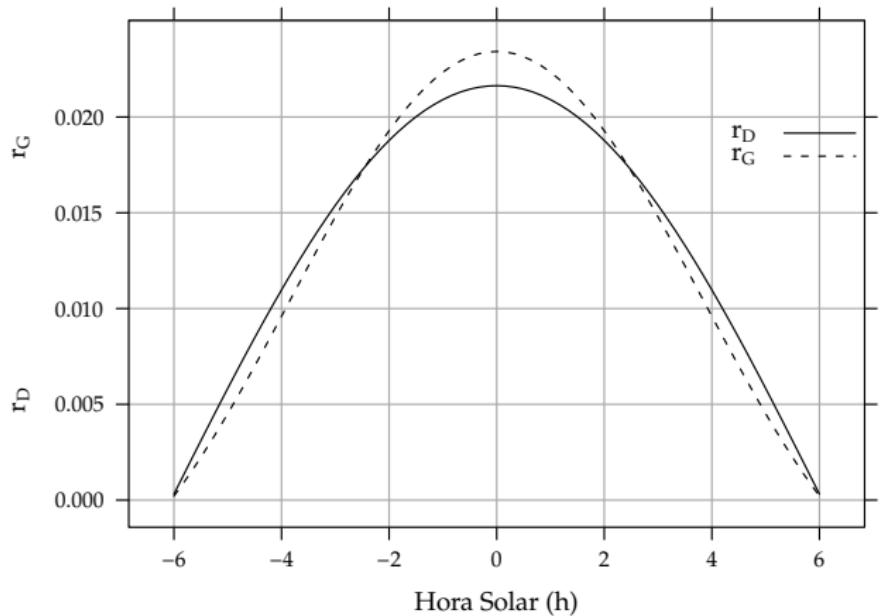
$$a = 0.409 - 0.5016 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

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

Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
suciedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
sucedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia Directa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
suciedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

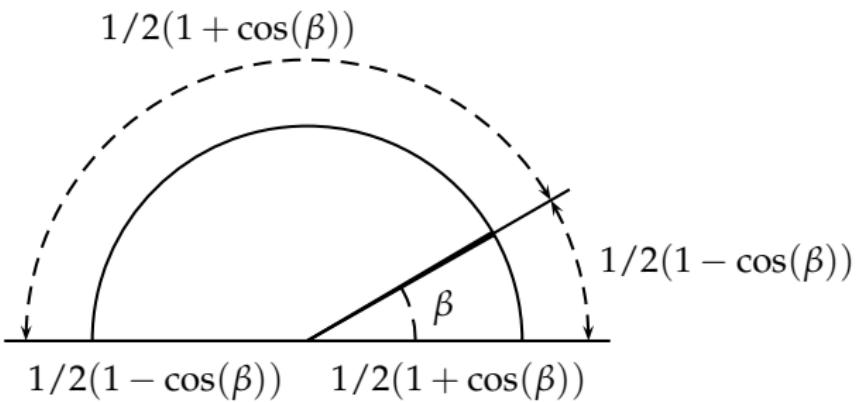
Bases de Datos

Control de Calidad

Factor de visión para Difusa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia Difusa isotrópica

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

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

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
sucedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia Difusa Anisotrópica

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

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

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

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia de Albedo

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

$$\rho = 0.2$$

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
sucedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Irradiancia sobre plano inclinado

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

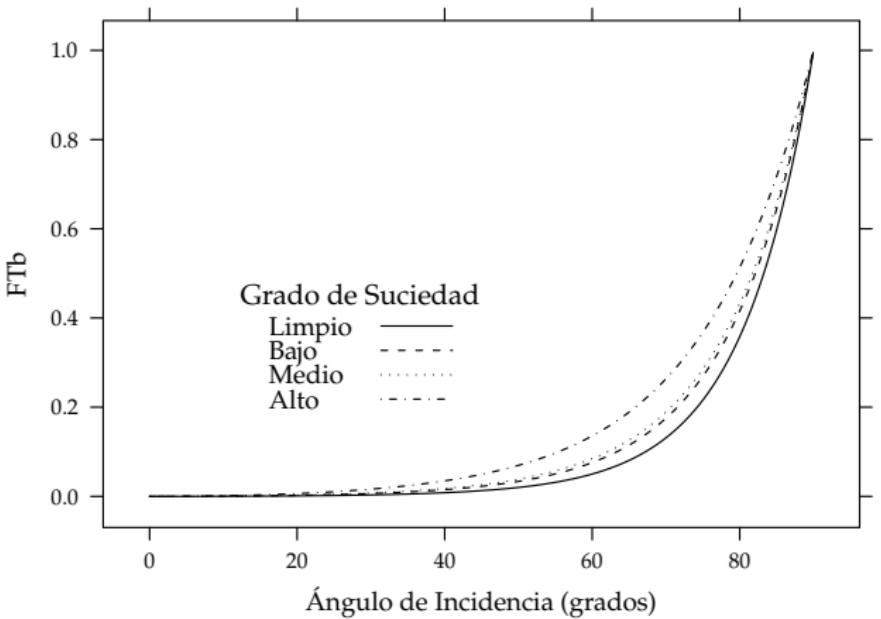
Control de Calidad

Radiación directa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

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

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Difusa y Albedo

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
sucedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

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

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

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

Coeficientes

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Grado de Suciedad	$\frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)}$	a_r	c_2
Limpio	1	0.17	-0.069
Bajo	0.98	0.20	-0.054
Medio	0.97	0.21	-0.049
Alto	0.92	0.27	-0.023

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Irradiancia a partir de irradiación diaria

Transformación al plano del generador

Pérdidas angulares y por suciedad

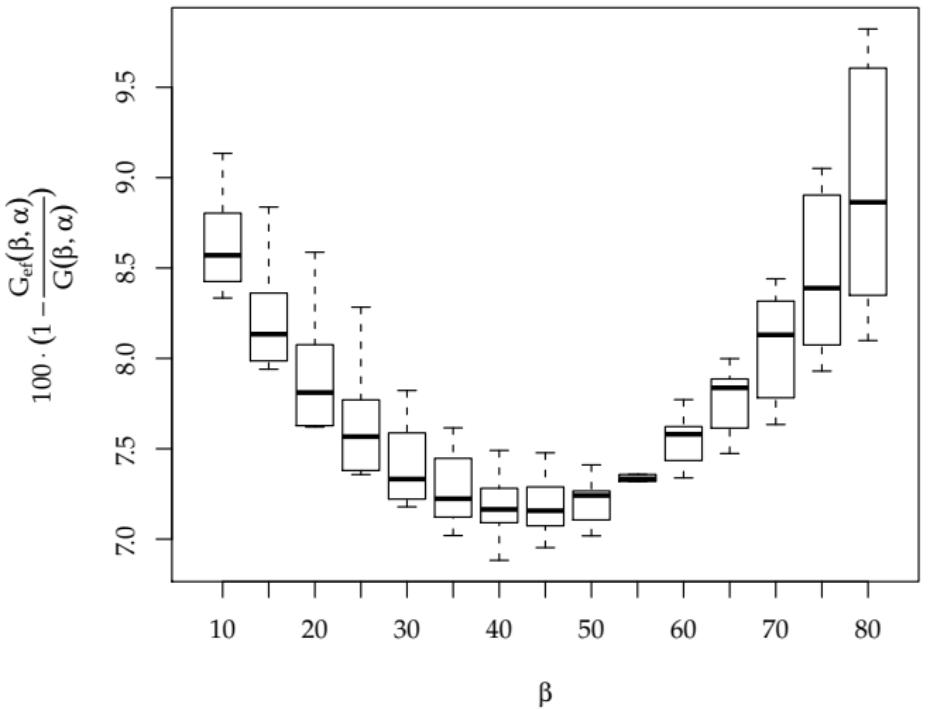
Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Pérdidas anuales



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Irradiancia a partir de
irradiación diaria

Transformación al plano del
generador

Pérdidas angulares y por
sucedad

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

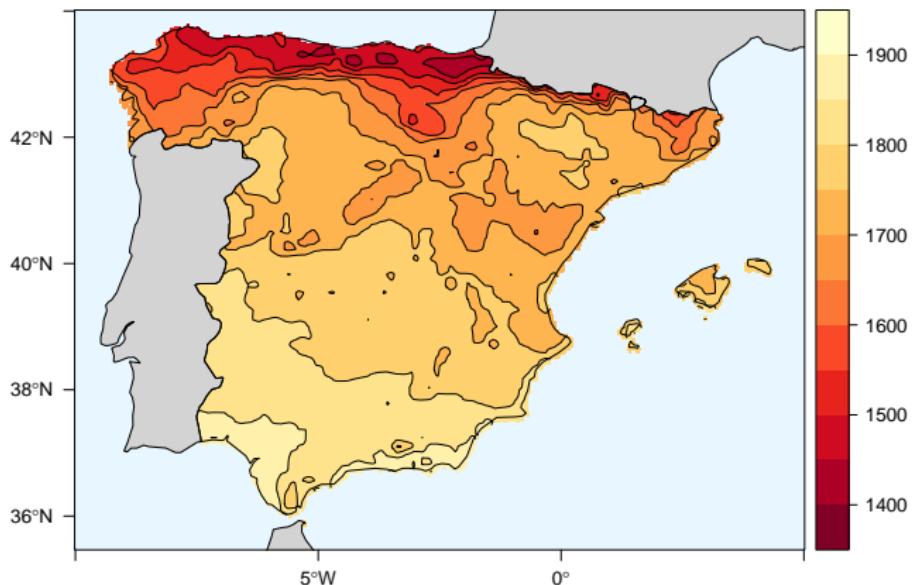
Bases de Datos

Control de Calidad

Radiación en Sistema estático

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

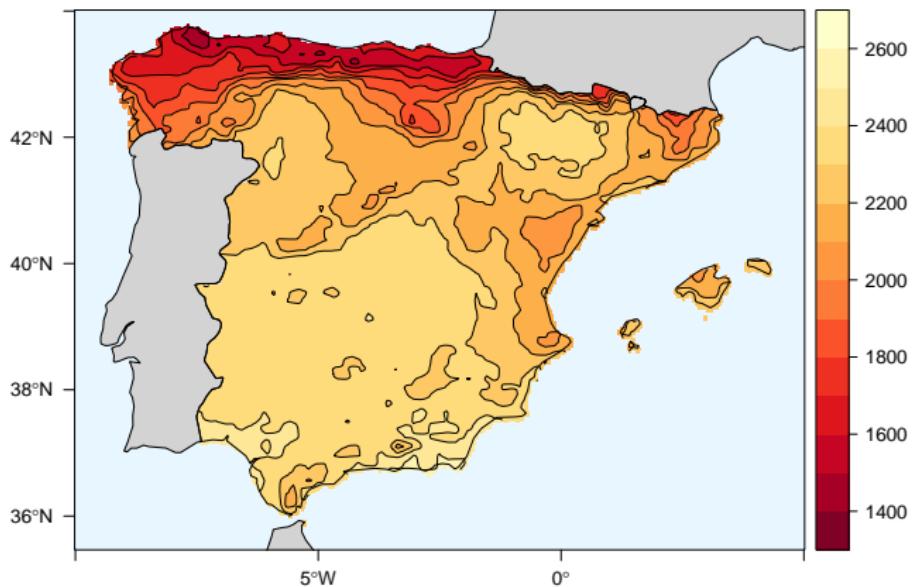
Bases de Datos

Control de Calidad

Radiación en Seguimiento Eje Horizontal

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

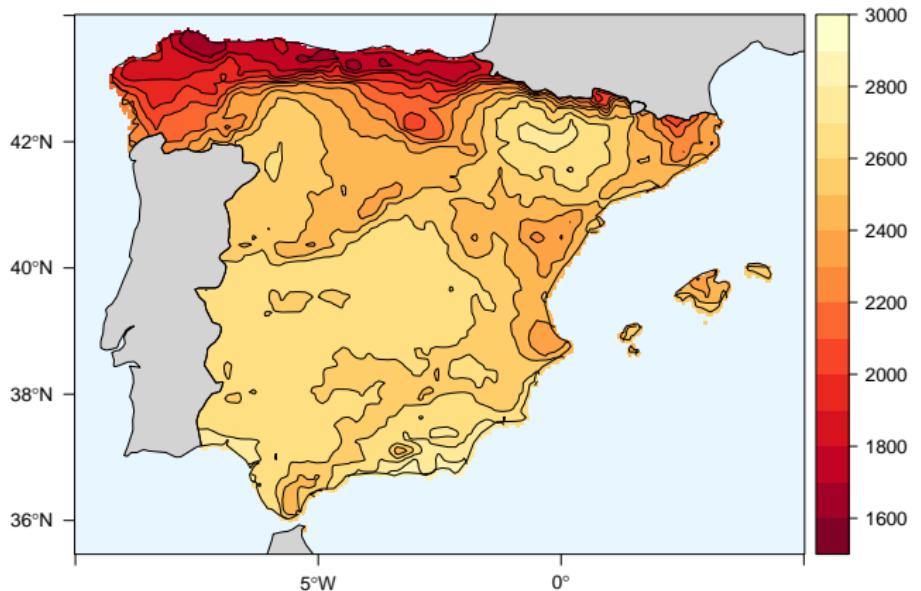
Bases de Datos

Control de Calidad

Radiación en Seguimiento Doble Eje

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías
Comparación entre tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

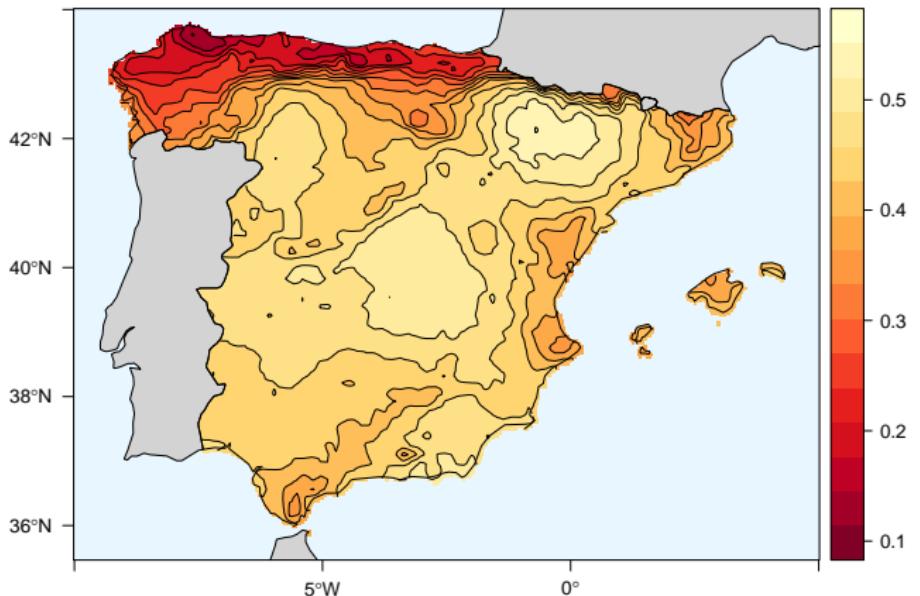
Bases de Datos

Control de Calidad

Comparación Doble Eje-Estática

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

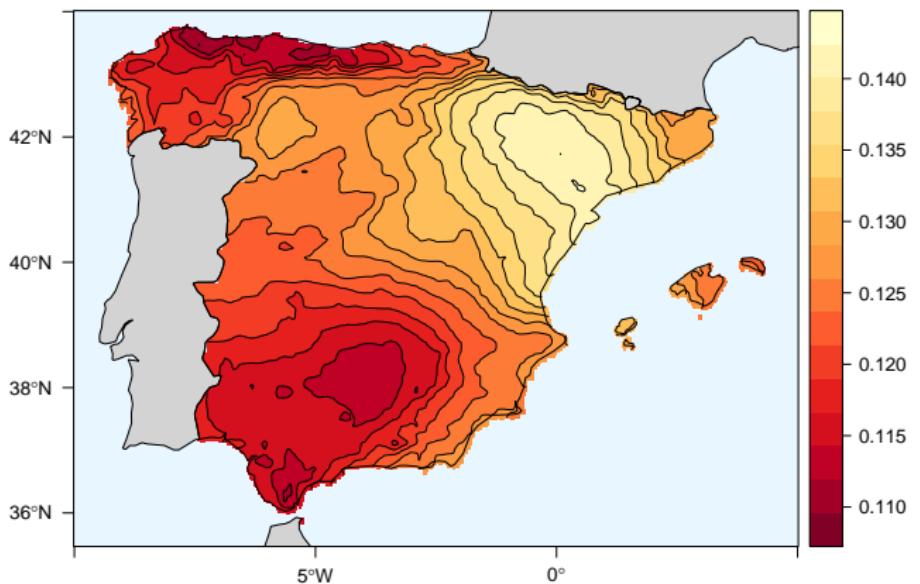
Bases de Datos

Control de Calidad

Comparación Doble Eje - Horizontal

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

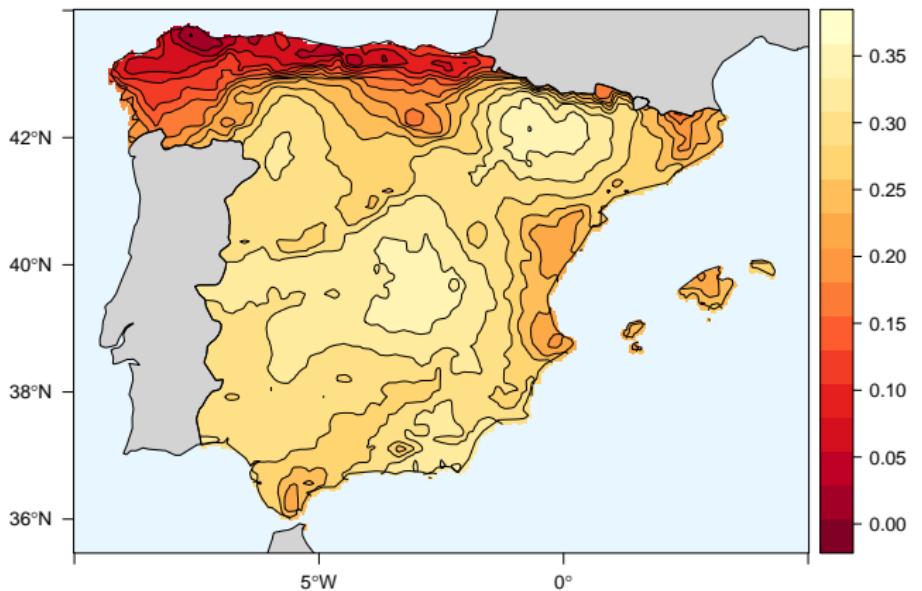
Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Comparación Eje Horizontal - Estática



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

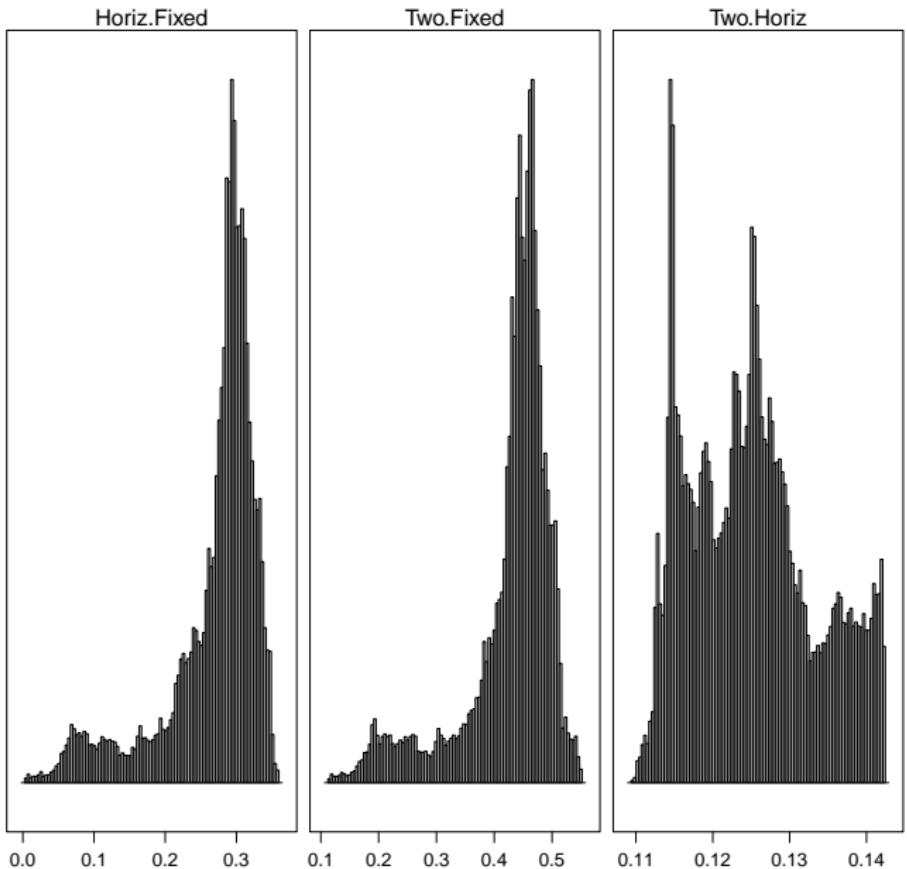
Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Comparación entre Sistemas

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar



Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

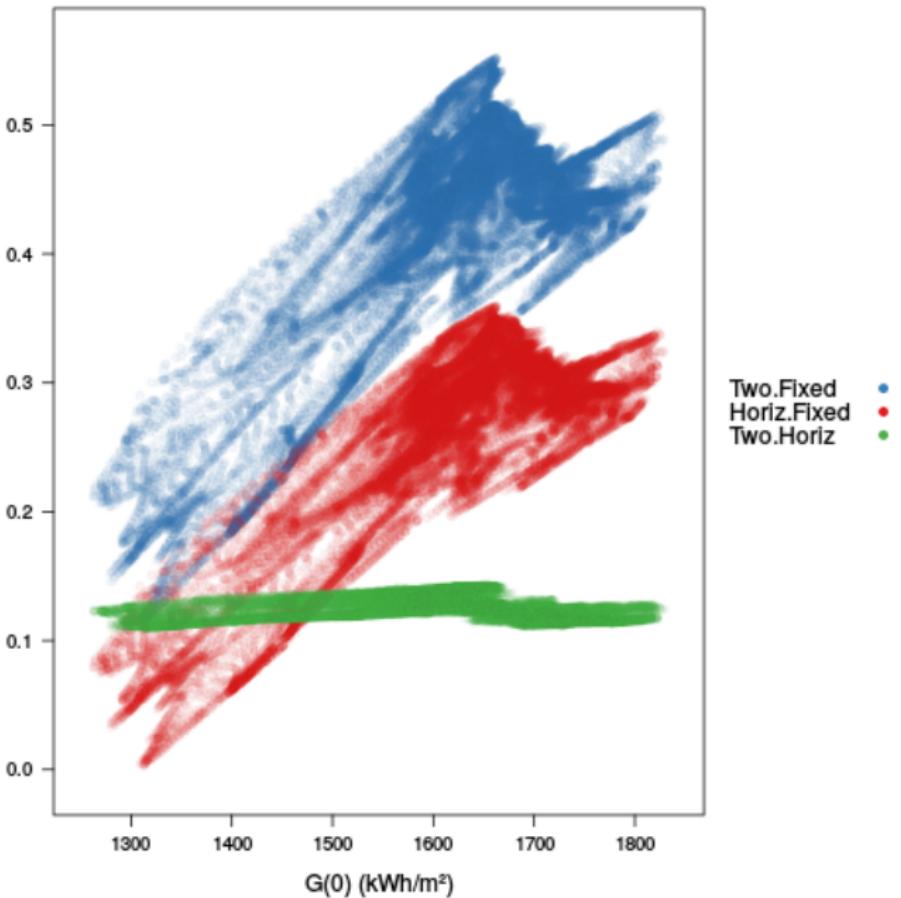
Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Comparación entre Sistemas



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Comparación entre
tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

Inclinación Optima Estática

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$|\phi| - \beta \approx 10^\circ$$

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot |\phi|$$

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

Sensibilidad al desapuntamiento

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

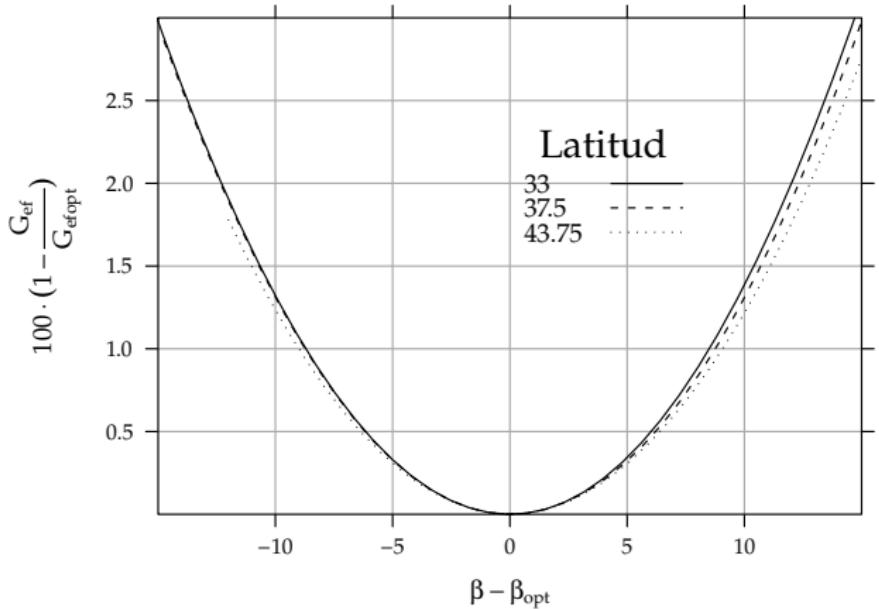
Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad



Radiación para inclinación óptima

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$\frac{G_{d,a}(0)}{G_{d,a}(\beta_{opt})} = 1 - 4.46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1.19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2$$

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

Cálculo de Radiación Efectiva

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$\frac{G_{efd,a}(\beta, \alpha)}{G_{d,a}(\beta_{opt})} = g_1 \cdot (\beta - \beta_{opt})^2 + g_2 \cdot (\beta - \beta_{opt}) + g_3$$

$$g_i = g_{i1}|\alpha|^2 + g_{i2}|\alpha| + g_{i3}$$

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
g_{1i}	$8 \cdot 10^{-9}$	$3.8 \cdot 10^{-7}$	$-1.218 \cdot 10^{-4}$
g_{2i}	$-4.27 \cdot 10^{-7}$	$8.2 \cdot 10^{-6}$	$2.892 \cdot 10^{-4}$
g_{3i}	$-2.5 \cdot 10^{-5}$	$-1.034 \cdot 10^{-4}$	0.9314

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

Cálculo para estática

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Ángulo de inclinación
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

Calcular la irradiación anual efectiva que incide en

- ▶ Un generador orientado al Sur e inclinado 20° en un lugar con latitud 30°N y una media anual de la irradiación global diaria en el plano horizontal de $5250 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, suponiendo una suciedad media.

Calcular la irradiación anual efectiva que incide en

- ▶ Un generador desorientado 20° del Sur e inclinado 40° en un lugar con latitud 50°N y una media anual de la irradiación global diaria en el plano horizontal de $5250 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, suponiendo una suciedad media.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Variabilidad Temporal y Espacial

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ La irradiancia solar extraterrestre depende de la latitud y el instante temporal (*proceso determinista*).
- ▶ La irradiancia solar incidente en la superficie terrestre es resultado de la interacción con la atmósfera cambiante: **variabilidad temporal y espacial** (*proceso estocástico*).

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

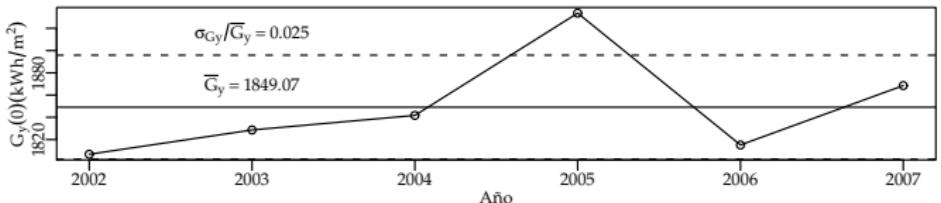
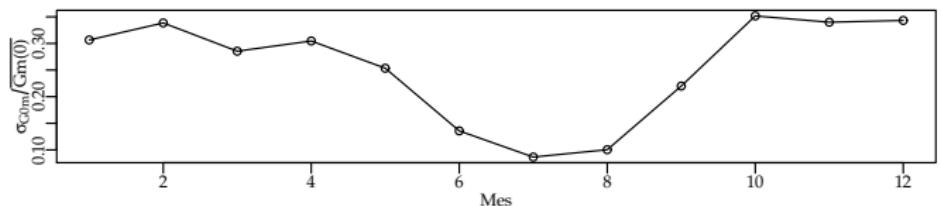
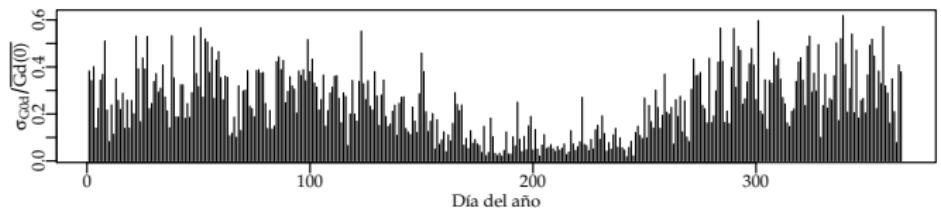
Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Variabilidad Temporal

Variabilidad de la irradiación diaria, mensual y anual durante el período comprendido entre 2001-2008 en Carmona, Sevilla



Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Variabilidad Temporal

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$\sigma_{\bar{G}} = \frac{\sigma_G}{\sqrt{N}}$$

- ▶ Predicción para un (día, mes, año) **determinado**:
 - ▶ Intervalo de confianza del 95% acotado por $1.96 \cdot \sigma_G$
- ▶ Predicción para un (día, mes, año) **promedio (durante N años)**:
 - ▶ Intervalo de confianza del 95% acotado por $1.96 \cdot \sigma_{\bar{G}}$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

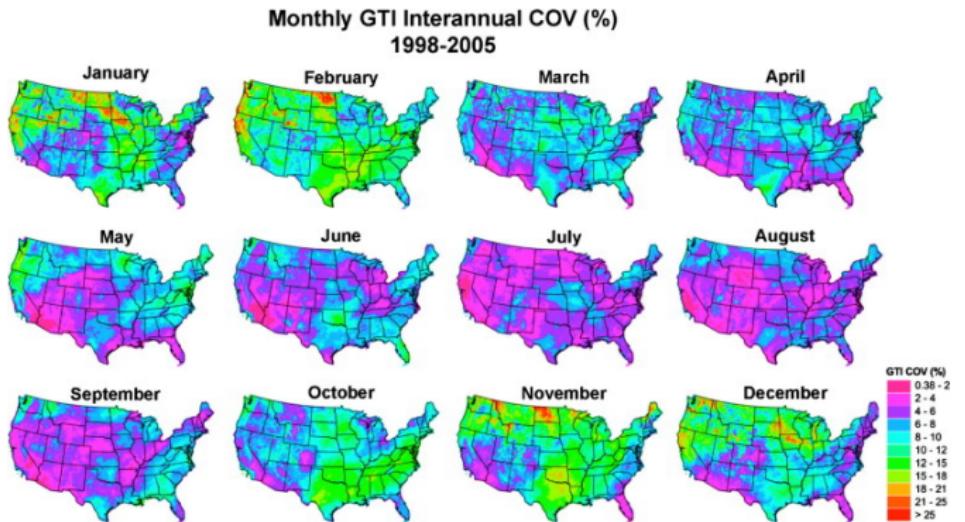
Métodos híbridos

Control de Calidad

Variabilidad Espacial

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



$$COV = 1/G_p \sqrt{\frac{\sum_1^n (G_p^2 - G_i^2)}{n}}$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

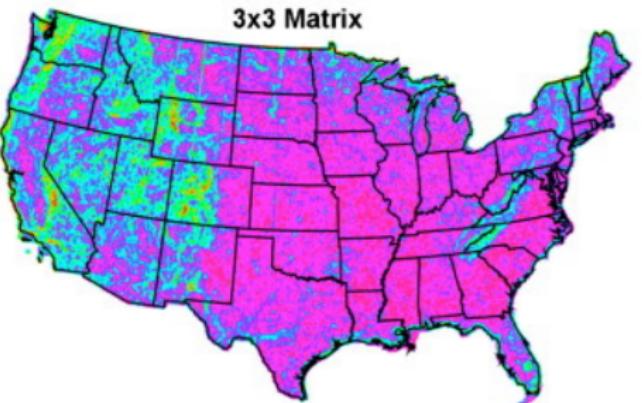
Métodos híbridos

Control de Calidad

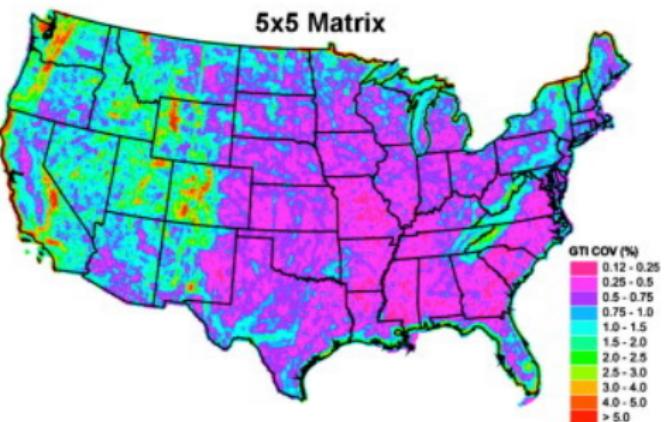
Variabilidad Espacial

Spatial GTI COV (%) of Annual Average 1998-2005

3x3 Matrix



5x5 Matrix



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
<http://oscarperpinan.github.io>

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Estimación a partir de Medidas

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Para estimar la radiación incidente es necesario contar con:
 - ▶ **Medidas cercanas*** (variabilidad espacial): distancia no superior a 10 km.
 - ▶ **Series temporales** largas (variabilidad temporal): 10 años.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Fuentes de datos

► Estaciones meteorológicas

- ▶ Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- ▶ Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- ▶ Precisión en caso de medida directa.
- ▶ Tipos:
 - ▶ Con medidor de radiación
 - ▶ Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Fuentes de datos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

► Estaciones meteorológicas

- ▶ Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- ▶ Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- ▶ Precisión en caso de medida directa.
- ▶ Tipos:
 - ▶ Con medidor de radiación
 - ▶ Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

► Imágenes de satélite

- ▶ Tiempos de muestreo bajos (mejorando)
- ▶ Resolución espacial alta
- ▶ Error debido a la estimación.

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Fuentes de datos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

► Estaciones meteorológicas

- ▶ Series largas y con tiempos de muestreo altos.
- ▶ Baja resolución espacial (medidas puntuales)
- ▶ Precisión en caso de medida directa.
- ▶ Tipos:
 - ▶ Con medidor de radiación
 - ▶ Sin medidor de radiación (modelos empíricos).

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

► Imágenes de satélite

- ▶ Tiempos de muestreo bajos (mejorando)
- ▶ Resolución espacial alta
- ▶ Error debido a la estimación.

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

► Híbrido

- ▶ Medidas terrestres combinadas con imágenes de
satélite

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Estaciones Meteorológicas: medida directa

La medida directa de radiación solar se realiza con un piranómetro.



- ▶ Pila termoeléctrica (termopares con barniz negro)
- ▶ Alojamiento con dos hemiesferas de cristal.
- ▶ Flujo de calor por radiación provoca tensión eléctrica en termopila.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Estaciones Meteorológicas: medida directa

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

La medida directa de radiación solar se realiza con un piranómetro.



- ▶ Respuestapectral plana para radiación visible.
- ▶ Respuesta perfecta al coseno del ángulo de incidencia (pérdidas por reflexión).

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Estaciones Meteorológicas: medida directa

La medida directa de radiación solar se realiza con un piranómetro.

- Requiere mantenimiento y calibración frecuente.

La red de estaciones que miden directamente radiación es escasa para estimaciones precisas en regiones grandes

- La proporción de estaciones con piranómetros es baja respecto a las que miden temperatura ambiente y precipitación (1:500).

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Frente a la baja densidad de estaciones con medida directa de radiación se emplean modelos empíricos

- ▶ Relaciones entre radiación y otras variables
 - ▶ Horas de brillo (*sunshine duration*)
 - ▶ Cobertura nubosa
 - ▶ Temperatura ambiente
 - ▶ Precipitación
 - ▶ Humedad
 - ▶ ...
- ▶ Los coeficientes de los modelos sólo se pueden ajustar en estaciones con medidas de radiación.
- ▶ Los coeficientes dependen del lugar de ajuste, pero se pueden interpolar para otras localizaciones.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:

Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

$$\frac{G(0)}{B_o(0)} = a_1 + b_1 \frac{S}{S_o}$$

- ▶ Problema: poca disponibilidad de datos

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- Radiación y Temperatura (Bristow y Campbell)

$$G(0) = a (1 - \exp(-b\Delta T^c)) \cdot B_o(0)$$

- Variaciones con más variables: Lluvia (si/no), rango antes y después, velocidad viento, humedad relativa.

$$G(0) = a (1 - \exp(-b\Delta T^c)) \cdot B_o(0) \cdot \left(1 + \sum_1^n p_j \cdot v_j \right) + p_{n+1}$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos
Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Fundamentos

- ▶ Los satélites meteorológicos están equipados con **radiómetros** (sensores de radiación electromagnética a diferentes frecuencias) que captan **radiación emitida por la Tierra**.
- ▶ La radiación emitida por la Tierra depende de la **reflexión del suelo**, y la **geometría y composición de la atmósfera**.
- ▶ Diferentes fenómenos físicos se detectan en **bandas de frecuencias** distintas (canales).
- ▶ Existen diversos procedimientos para **estimar radiación solar** en superficie a partir de la información de los diferentes canales del radiómetro.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Satélites Geoestacionarios Europeos: Meteosat

- ▶ **MFG:** Meteosat First Generation (7 satélites)
 - ▶ Equipados con el radiómetro MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imager).
 - ▶ Tres canales: visible, infrarrojo, vapor de agua.
- ▶ **MSG:** Meteosat Second Generation (3 satélites)
 - ▶ Equipados con dos radiómetros:
 - ▶ **SEVIRI** (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager): 12 canales
 - ▶ GERB (Geostationary Earth Radiation Budget): infrarrojo visible.



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción
Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres
Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Procedimientos: Heliosat-2

Pasos

- ▶ Establecer **albedo de referencia** (*suelo*).
- ▶ Estimar **índice de cobertura nubosa**.
- ▶ Estimar radiación en superficie a partir de cobertura nubosa y **modelo de cielo claro**.

- ▶ Empleado para base HelioClim
- ▶ Usan datos de MVIRI
- ▶ Accesible via SoDa:
<http://www.soda-is.com/heliosat/index.html>

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Procedimientos: CM SAF

► Fundamento:

- ▶ Se emplea un **Radiative Transfer Model (RTM)**, libRadtran, para generar una matriz de estados (**Look-up table, LUT**) relaciona la transmitancia atmosférica y el albedo de la atmósfera para variedad de estados.
- ▶ La irradiancia en superficie se estima multiplicando la irradiancia extra-atmosférica por la **transmitancia atmosférica determinada interpolando en la LUT**.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:

Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Procedimientos: CM SAF

► Fundamento:

- ▶ Se emplea un **Radiative Transfer Model (RTM)**, libRadtran, para generar una matriz de estados (**Look-up table, LUT**) relaciona la transmitancia atmosférica y el albedo de la atmósfera para variedad de estados.
- ▶ La irradiancia en superficie se estima multiplicando la irradiancia extra-atmosférica por la **transmitancia atmosférica determinada interpolando en la LUT**.

► Dos LUTs: cielo nuboso, cielo claro.

▶ Cielo nuboso:

- ▶ Estimación de albedo y estado atmosférico a partir de imágenes.
- ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo nuboso.

▶ Cielo claro:

- ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo claro **sin estimación previa** de albedo.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Procedimientos: CM SAF

► Fundamento:

- ▶ Se emplea un **Radiative Transfer Model (RTM)**, libRadtran, para generar una matriz de estados (**Look-up table, LUT**) relaciona la transmitancia atmosférica y el albedo de la atmósfera para variedad de estados.
- ▶ La irradiancia en superficie se estima multiplicando la irradiancia extra-atmosférica por la **transmitancia atmosférica determinada interpolando en la LUT**.

► Dos LUTs: cielo nuboso, cielo claro.

▶ Cielo nuboso:

- ▶ Estimación de albedo y estado atmosférico a partir de imágenes.
- ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo nuboso.

▶ Cielo claro:

- ▶ Estimación de transmitancia interpolando en LUT para cielo claro **sin estimación previa** de albedo.

► Emplean datos del **radiómetro MSG/SEVIRI**

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Procedimientos: LSA SAF

- ▶ Generación de **máscara de nubes** a partir de imagen usando algoritmo de **NWC-SAF**.
- ▶ Para **zonas sin nubes**: modelo de cielo claro sin usar datos de imagen.
- ▶ Para **zonas cubiertas**: modelo de transmitancia atmosférica a partir de imágenes.
- ▶ Emplean datos del **radiómetro MSG/SEVIRI**

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Wiki con recursos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

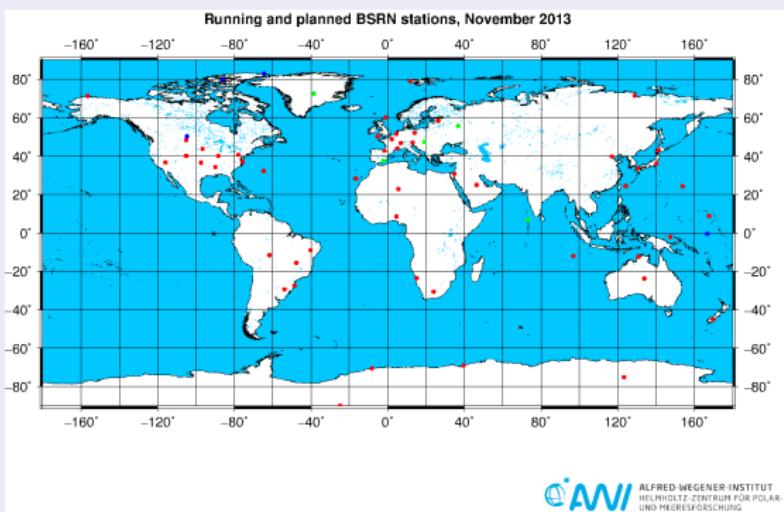
Control de Calidad

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

Baseline Surface Radiation Network

<http://www.bsrn.awi.de/>

- ▶ BSRN provides near-continuous, long-term, in situ-observed, Earth-surface, broadband irradiances (solar and thermal infrared) and certain related parameters from a network of more than 50 globally diverse sites.



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
<http://oscarperpinan.github.io>

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Baseline Surface Radiation Network

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción
Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos
Imágenes de Satélite
Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres
Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

- ▶ Validation and confirmation of satellite and computer model estimates.
- ▶ Datos desde: [http://www.bsrn.awi.de/en/data/
data_retrieval_via_pangaea/](http://www.bsrn.awi.de/en/data/data_retrieval_via_pangaea/)

Measurement and Instrumentation Data Center NREL

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

<http://www.nrel.gov/midc/>

Radiación global, directa y difusa (y otras variables) con muestreo de 1 min en diversas localidades de EEUU.



Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

MAGRAMA-SIAR

http:

//eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx

- ▶ El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) registra datos agroclimáticos relacionados con demanda hídrica de las zonas de riego.
- ▶ Más de 400 estaciones.
- ▶ Valores diarios y horarios



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

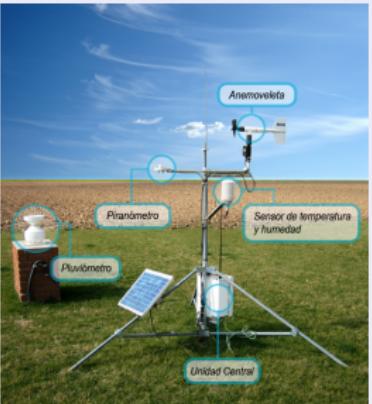
Bases de Datos

Introducción
Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos
Imágenes de Satélite
Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres
Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Sensores

- ▶ Temperatura y Humedad
- ▶ Piranómetro
- ▶ Anemóveta
- ▶ Pluviómetro
- ▶ Temperatura del suelo (algunas)



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción
Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos
Imágenes de Satélite
Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres
Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Radiación

- ▶ Alrededor de 30 estaciones en todo el territorio.
- ▶ Medidas de global, difusa y directa.
- ▶ Sólo gráficas.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Estaciones «convencionales»

- ▶ Presión, temperatura, viento, humedad, lluvia.
- ▶ Permite descarga de datos horarios por día.

Redes de Comunidades Autónomas

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ [Meteogalicia](#)
- ▶ [MeteoNavarra](#)
- ▶ [Cataluña](#)
- ▶ [MeteoEuskadi](#)
- ▶ [Andalucía](#)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción
Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos
Imágenes de Satélite
Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres
Fuentes de Datos: Satélite
Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Wiki con recursos

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

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

Surface meteorology and Solar Energy (SSE)

- ▶ 200 satellite-derived meteorology and solar energy parameters **monthly averaged** from 22 years of data
- ▶ Resolución $1^\circ \times 1^\circ$

<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

- ▶ **EUMETSAT** is the European operational satellite agency for monitoring weather, climate and the environment.
- ▶ **Satellite Application Facilities (SAFs)**
 - ▶ Dedicated centres of excellence for processing satellite data.
 - ▶ Generate and disseminate operational EUMETSAT products and services.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

- ▶ **SAF on Climate Monitoring (CM SAF)**: provision of satellite-derived geophysical parameter data sets suitable for **climate monitoring**
 - ▶ Environmental Data Records (EDR): time-tagged earth-located geophysical parameters produced from sensor data. EDRs are derived in low to medium latency not fulfilling strictest climate requirements.
 - ▶ Climate Data Records (CDR): time series of measurements of sufficient length, consistency, and continuity to determine climate variability and change.
- ▶ **SAF on Land Surface Analysis (LSA SAF)**: generates, archives and disseminates, on an **operational basis**, a set of parameters involved in the surface radiation budget, evapotranspiration, vegetation cover and fire-related products.

SAFs: Radiación

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ **CM SAF:** Surface incoming shortwave radiation (SIS)
 - ▶ AEMET ha analizado las estimaciones para España en su [Atlas de Radiación](#).
- ▶ **LSA SAF:** Down-welling surface short-wave radiation flux (DSSF)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

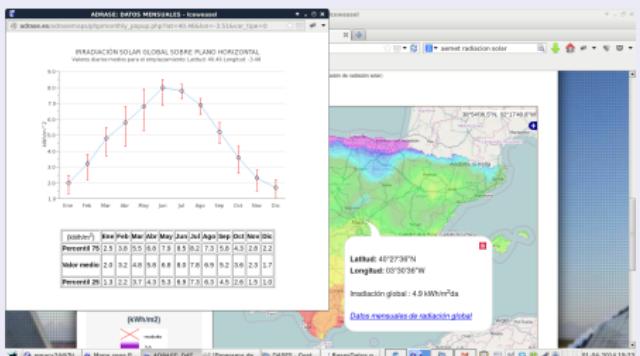
Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

- ▶ Radiación solar media mensual, resolución aproximada de 5x5 km.
 - ▶ Media mensual y anual más probable durante un periodo de largo plazo (imágenes de satélite, modelo aproximadamente Heliosat)
 - ▶ Variabilidad esperada de los valores diarios mensuales: (series largas de datos de estaciones de AEMET y extrapolación espacial con IDW)



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
<http://oscarperpinan.github.io>

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Interpolación Espacial

Objetivo: mejorar la resolución espacial de medidas dispersas

- ▶ **Inverse Distance Weighting (IDW):** determinista.
- ▶ **Ordinary Kriging:** modelo determinista para la media (constante) y estocástico para residuos.

$$\hat{z}(\mathbf{s}) = \mu + \epsilon(\mathbf{s})$$

- ▶ **Kriging with External Drift (KED):** modelo determinista para la media incorporando información de una variable con alta densidad espacial.

$$\hat{z}(\mathbf{s}_\theta) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k q_k(\mathbf{s}_\theta) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \epsilon(\mathbf{s}_i)$$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas
Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

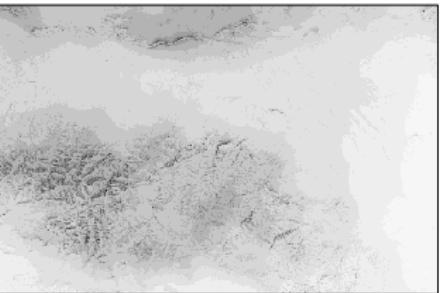
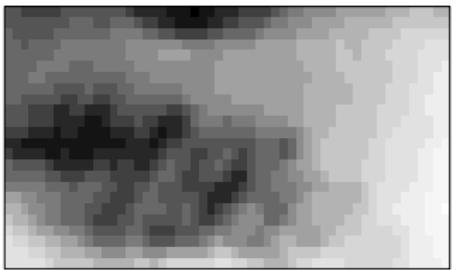
Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Corrección por topografía

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar



Sky-View Factor (SVF) Proporción de cielo visible para un receptor horizontal (afecta a la radiación difusa isotrópica)

$$SVF = 1 - \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta_{hor} d\theta$$

Horizon blocking Bloqueo de región circunsolar por horizonte: afecta a radiación directa y difusa anisotrópica

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos: Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

[http:](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php)

[//re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php)

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) is a research, demonstration and policy-support instrument for geographical assessment of the solar energy resource in the context of integrated management of distributed energy generation.

- ▶ Computation of clear-sky global irradiation on a horizontal surface
- ▶ Sky obstruction by local terrain features (hills or mountains) calculated from the digital elevation model.
- ▶ Interpolation of the clear-sky index and computation of global irradiation on a horizontal surface.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Introducción

Estaciones Meteorológicas

Estaciones Meteorológicas:
modelos empíricos

Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Variable aleatoria y proceso estocástico

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Una **variable aleatoria** es una función que asigna un único numero real a cada resultado de un espacio muestral en un experimento.
- ▶ Un **proceso estocástico** es una variable aleatoria que evoluciona a lo largo del **tiempo** (p.ej. la radiación).

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Función de densidad de probabilidad

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

La función de densidad de probabilidad, $f(X)$, de una variable aleatoria **asigna probabilidad** a un suceso:

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$$

$$P(X < b) = \int_{-\infty}^b f(x)dx$$

$$P(X > a) = \int_a^{\infty} f(x)dx$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

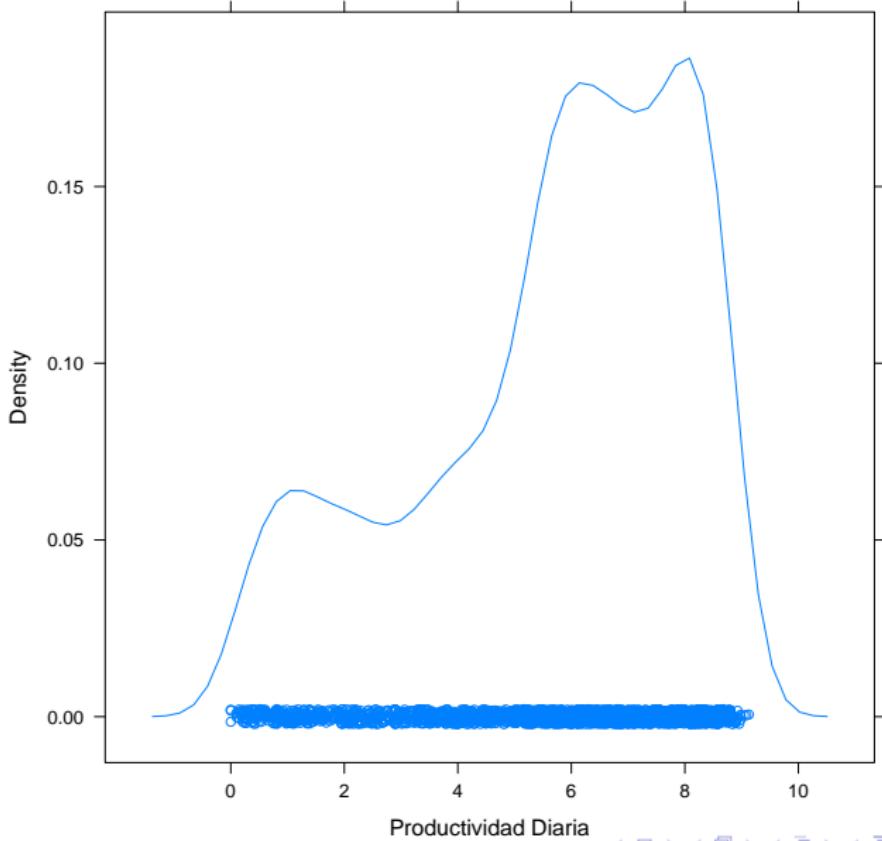
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Función de Densidad de Probabilidad

Funcion de densidad de probabilidad



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

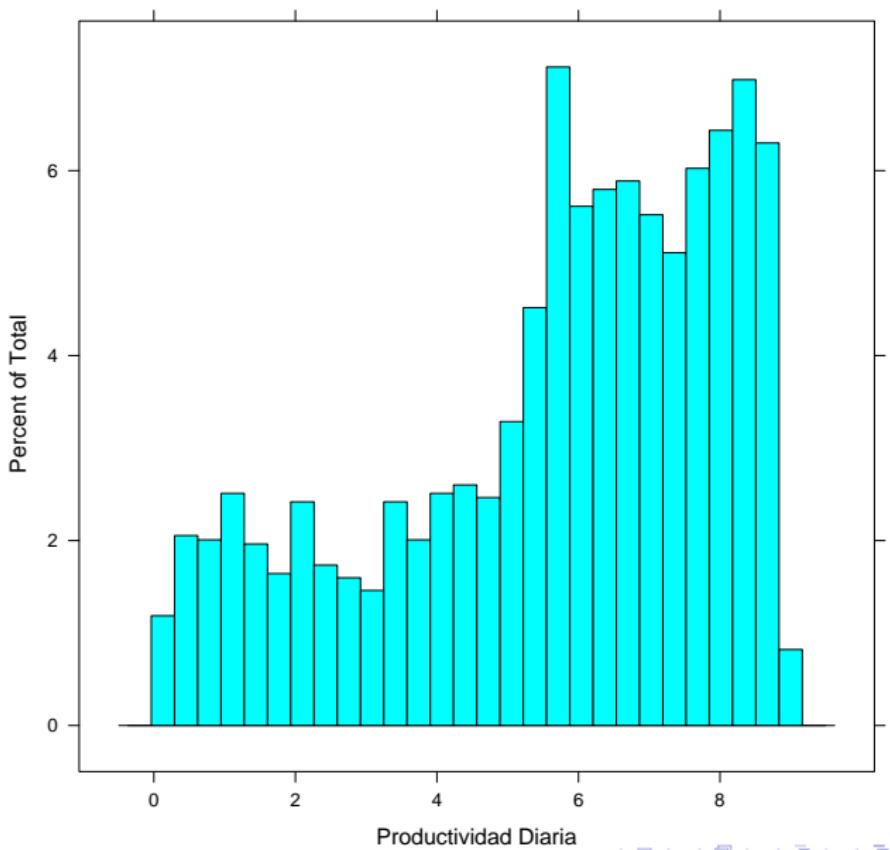
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Histograma

Histograma



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Media, varianza y desviación estándar

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

- ▶ La **media** de una variable aleatoria es el **centro de masas** de su función densidad de probabilidad:

$$\mu_X = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx$$

- ▶ La **varianza** de una variable aleatoria es la **media del cuadrado de las desviaciones** respecto a la media:

$$\sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f(x) dx$$

- ▶ La **desviación estándar** es la raiz cuadrada de la varianza: $\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Combinación lineal de variables aleatorias

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ La **media de la suma** de varias variables aleatorias **independientes** es la suma de las medias:

$$\mu_{X_1+\dots+X_n} = \mu_{X_1} + \dots + \mu_{X_n}$$

- ▶ La **varianza de la suma o resta** de varias variables aleatorias **independientes** es la **suma** de las varianzas:

$$\sigma_{X_1 \pm \dots \pm X_n}^2 = \sigma_{X_1}^2 + \dots + \sigma_{X_n}^2$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Media y varianza de la media muestral

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Una **muestra de una población** es un conjunto de variables aleatorias independientes ($X_1 \dots X_n$).
- ▶ Si se toma una muestra de una población cuya media es μ y su varianza es σ^2 , entonces la media de la muestra es otra variable aleatoria (que es una suma de variables aleatorias)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Media y varianza de la media muestral

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

- ▶ Por tanto, la **media de la media muestral** es la media de población:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_n X_i = \mu$$

- ▶ La **varianza de la media muestral** es la suma de las varianzas:

$$\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma_{\frac{1}{n}X_1}^2 + \dots + \sigma_{\frac{1}{n}X_n}^2 = \frac{\sigma^2}{N}$$

Por tanto, una forma de **reducir la incertidumbre** es realizar la **medida en repetidas ocasiones**.

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Mediana y cuartiles

- ▶ La **mediana** divide el conjunto de valores de la variable en **dos mitades** iguales (divide el área encerrada por la función densidad de probabilidad en dos partes iguales).
- ▶ Los **cuartiles** dividen este área en **cuatro** partes iguales.
- ▶ El área encerrada entre cada par de cuartiles es igual al 25% del total.
- ▶ La **mediana** es el **segundo cuartil**.
- ▶ La **distancia intercuartil** (definida entre los cuartiles 1 y 3) es una **medida de la dispersión** de la variable.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

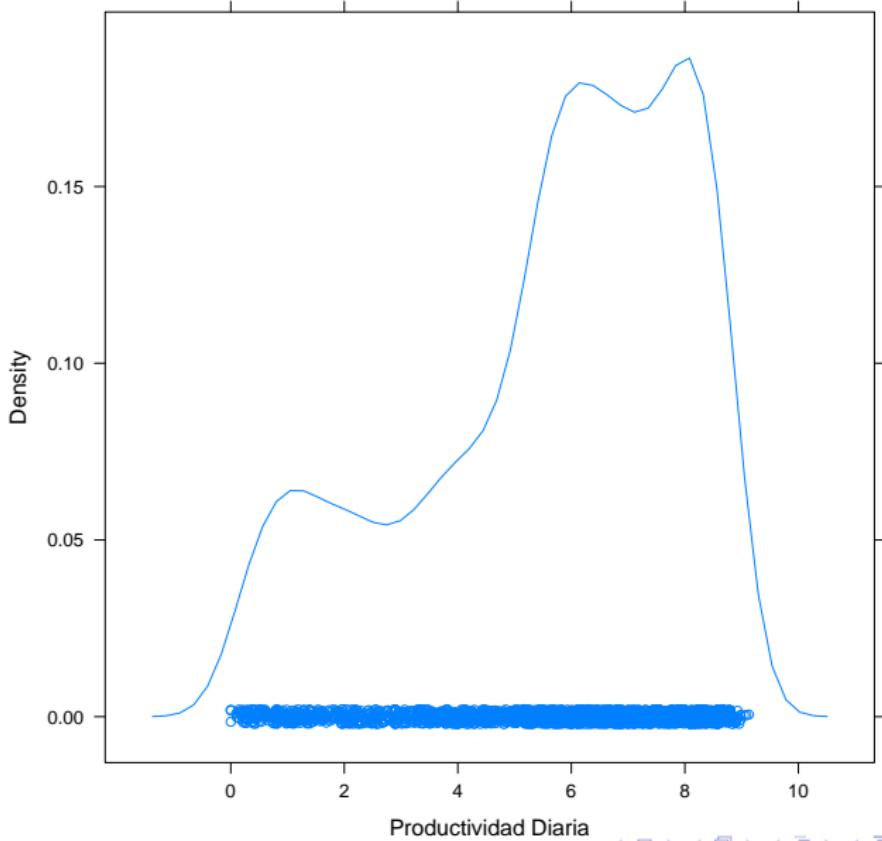
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Función de Densidad de Probabilidad

Funcion de densidad de probabilidad



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

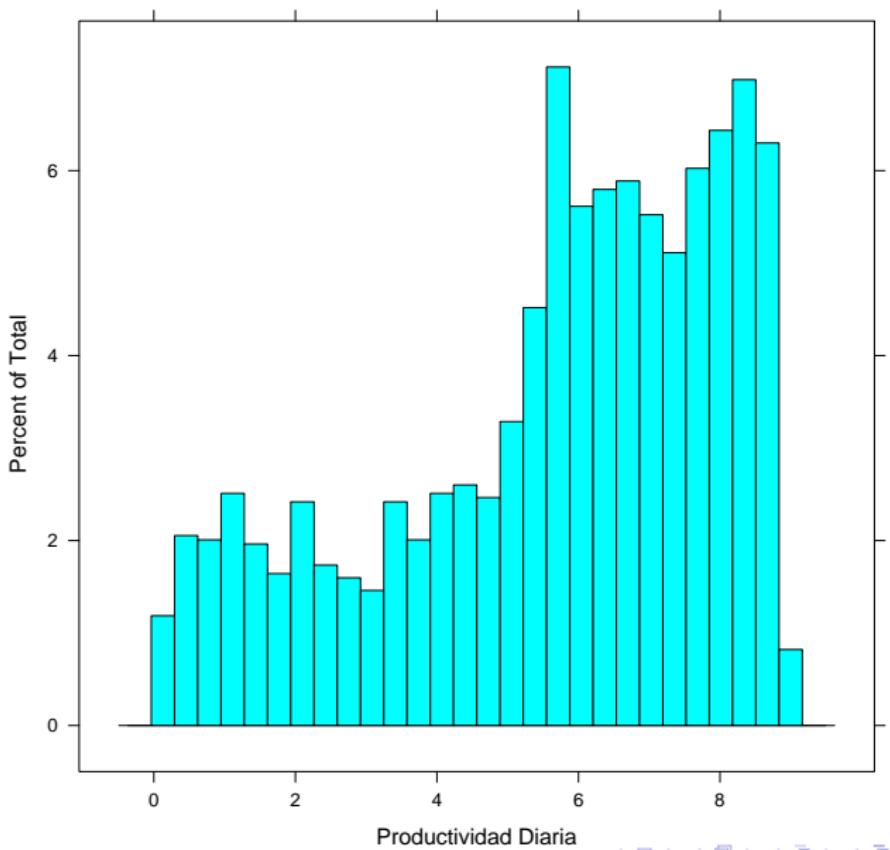
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Histograma

Histograma



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Gráficos boxplot

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

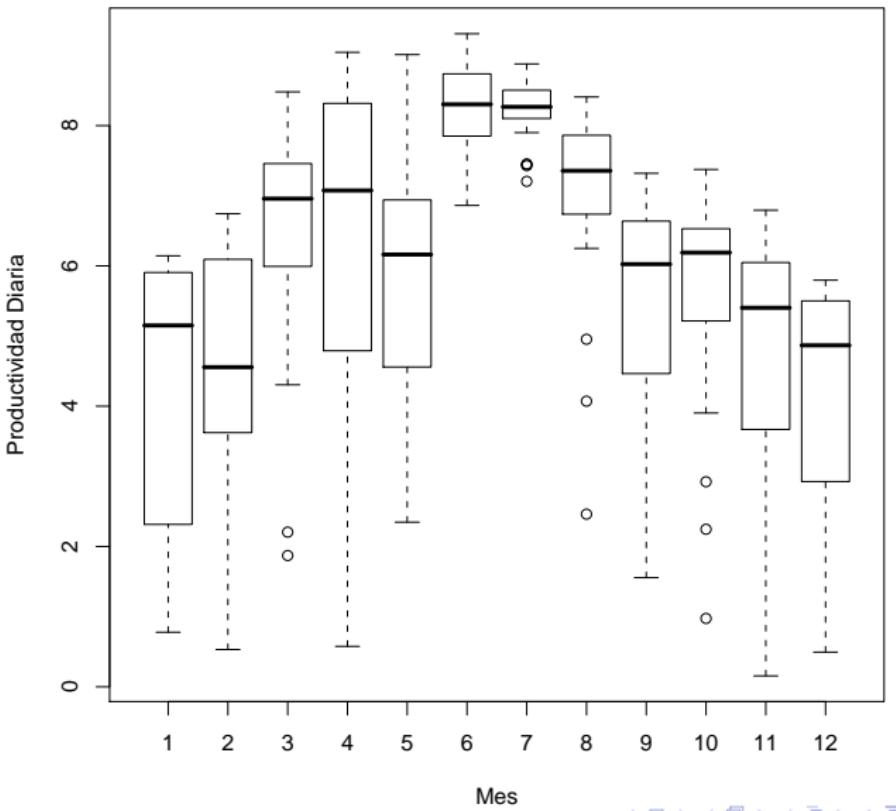
Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

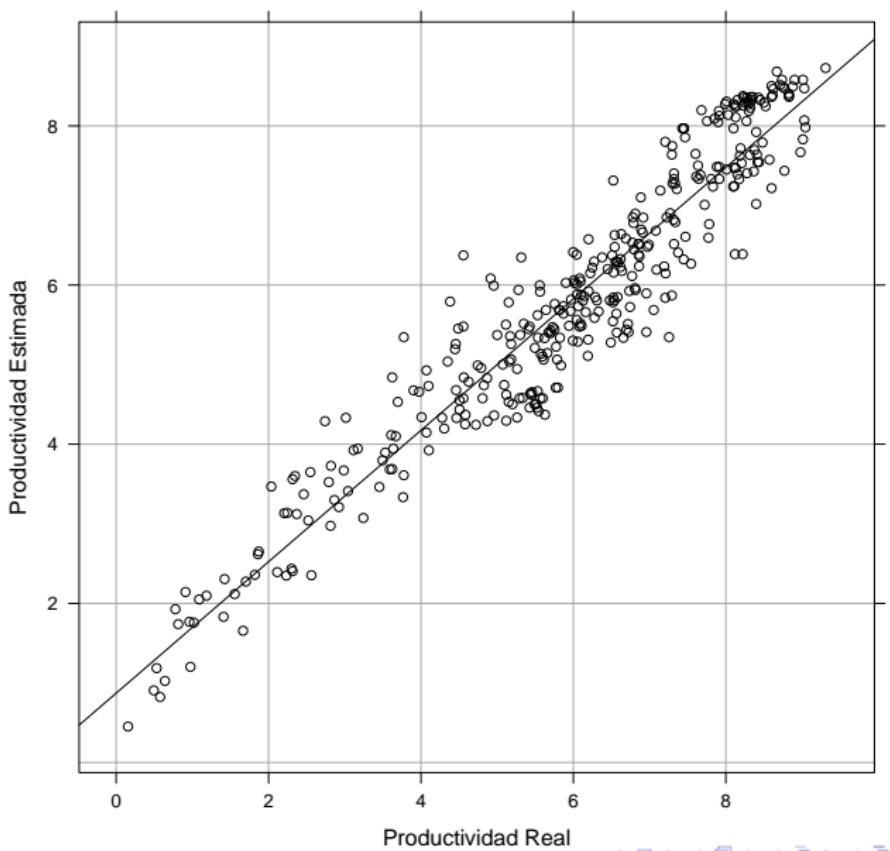
Control de Calidad de
Modelos

Variabilidad Mensual de la Productividad diaria



Gráficos de dispersión

Estimación de Productividad Diaria



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

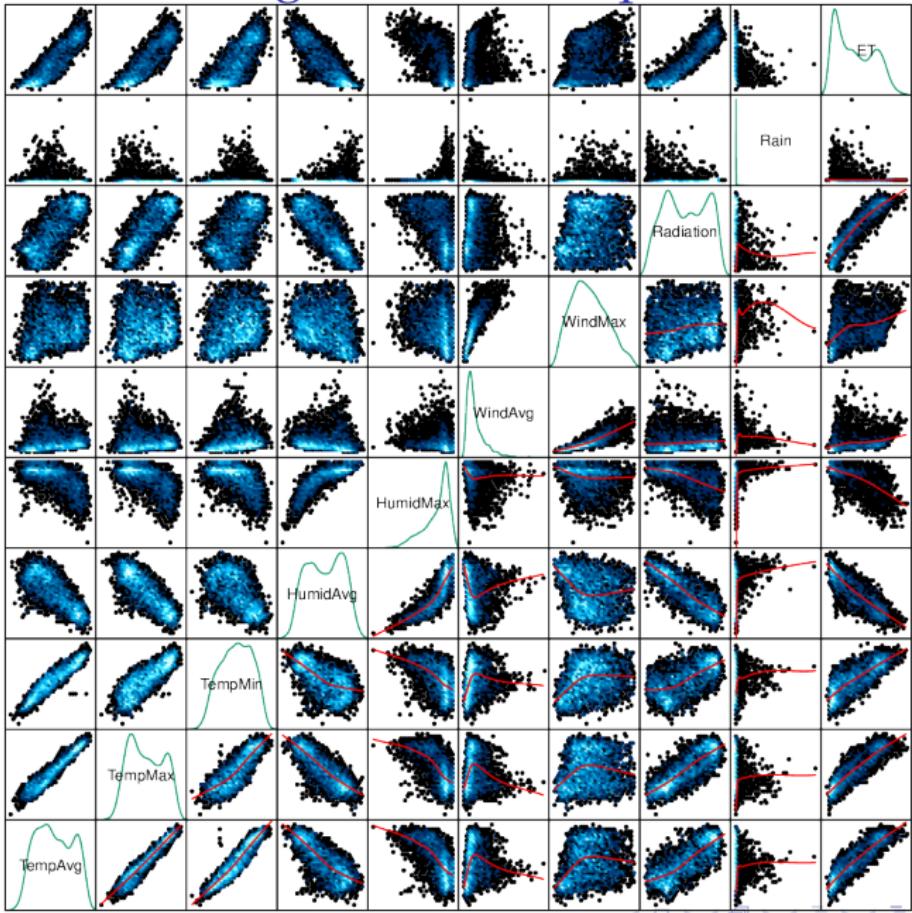
Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Matrices de gráficos de dispersión



Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Introducción

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Las medidas recogidas por estaciones meteorológicas se deben filtrar para eliminar datos erroneos.

- ▶ Límites Físicos
- ▶ Tests de persistencia
- ▶ Tests de rampas (irradiancia)
- ▶ Tests de envolvente (medida de varias componentes)
- ▶ Coherencia espacial
- ▶ Coherencia estadística

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Irradiación Diaria

- ▶ La radiación global en el plano horizontal debe ser inferior a la extraterrestre ($K_t \leq 1$)

$$G_d(0) \leq B_o d(0)$$

- ▶ El índice de claridad debe ser superior a 0.03

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

- ▶ La radiación global en el plano horizontal debe ser inferior a la de un modelo de cielo claro

Irradiancia (intradiaria)

- El índice de claridad debe ser inferior a 1 cuando la altura solar es suficiente:

$$k_t < 1 \text{ si } \gamma_s > 2^\circ$$

- Límites inferiores para cielos cubiertos (baja transparencia atmosférica)

$$k_t \geq 10^{-4} \cdot (\gamma_s - 10^\circ) \text{ si } \gamma_s > 10^\circ$$

$$G \geq 0 \text{ si } \gamma_s \leq 10^\circ$$

Tests de persistencia

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Variabilidad de irradiancia

- ▶ La media y la desviación estándar se calculan con todas las muestras de un día completo.

$$\frac{1}{8}\bar{k}_t \leq \sigma_{k_t} \leq 0.35$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Tests de rampas

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Límites a las variaciones de la irradiancia entre instantes sucesivos

$$|k_t(t) - k_t(t-1)| < 0.75 \text{ si } \gamma_s(t) > 2^\circ$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

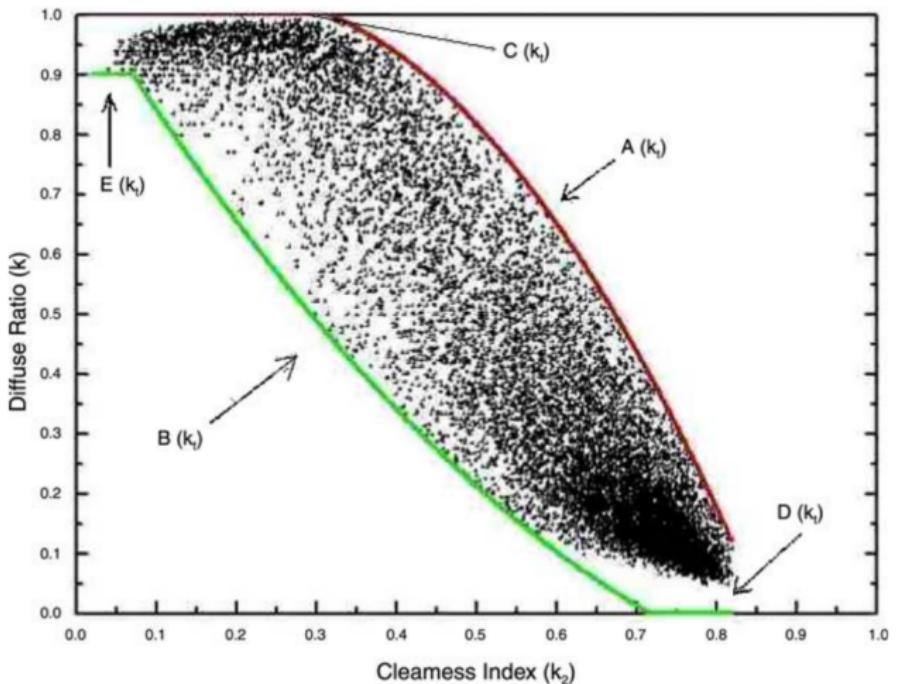
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Tests de envolvente

- Sólo para estaciones con medida simultánea de global y directa/difusa.



Coherencia espacial

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Las medidas de una estación se pueden comparar con las recogidas por estaciones cercanas.
- ▶ Esta comprobación debe realizarse con **datos agregados** (diarios) (la variabilidad espacial intradiaria puede ser alta)
- ▶ Esta comprobación debe realizarse con estaciones que tienen **clima y geografía similar**.

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Coherencia espacial

Pasos

- ▶ Estimamos la irradiación en el lugar, x_0 , con la interpolación espacial de las estaciones cercanas, x_i .
 - ▶ Los pesos w_i son una función inversa de la distancia (IDW).

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

- ▶ Comparamos la irradiación estimada, $\hat{G}_d(x_0)$, con la medida en la estación, $G_d(x_0)$.

$$\left| \hat{G}_d(x_0) - G_d(x_0) \right|$$

- ▶ La diferencia absoluta debe estar por debajo de un límite (p.ej. 50%)

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

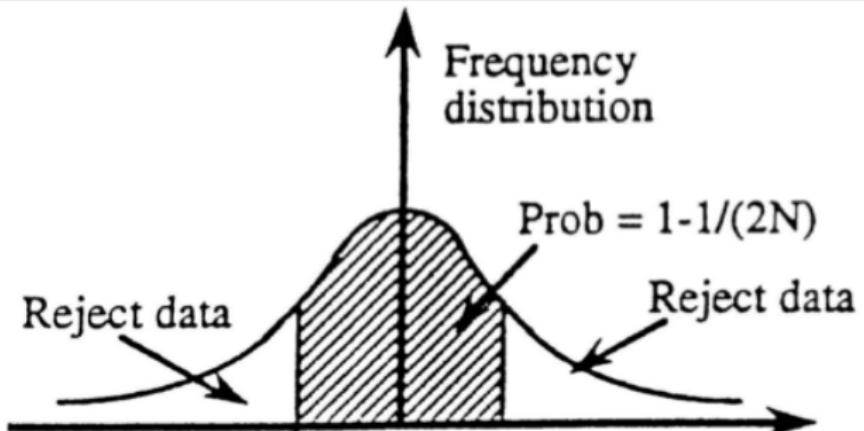
Control de Calidad de
Modelos

Coherencia estadística

Una medida puede ser etiquetada como *outlier* si es poco probable que pertenezca a la misma distribución que el conjunto.

Método de Chauvenet

Una medida es un *outlier* si la probabilidad de obtener su desviación respecto de la media es inferior al inverso de 2 veces el número de elementos en el conjunto.



Método de Chauvenet

- ▶ Sean $G_d(x_i)$ las medidas de radiación diaria del conjunto formado por N estaciones.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Método de Chauvenet

- ▶ Sean $G_d(x_i)$ las medidas de radiación diaria del conjunto formado por N estaciones.
- ▶ Se calcula la media, \bar{G}_d , la desviación estándar, σ_{G_d} .

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Método de Chauvenet

- ▶ Sean $G_d(x_i)$ las medidas de radiación diaria del conjunto formado por N estaciones.
- ▶ Se calcula la media, \bar{G}_d , la desviación estándar, σ_{G_d} .
- ▶ Se calcula la distancia estadística de cada estación al conjunto:

$$d_i = \frac{G_d(x_i) - \bar{G}_d}{\sigma_{G_d}}$$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Método de Chauvenet

- ▶ Sean $G_d(x_i)$ las medidas de radiación diaria del conjunto formado por N estaciones.
- ▶ Se calcula la media, \bar{G}_d , la desviación estándar, σ_{G_d} .
- ▶ Se calcula la distancia estadística de cada estación al conjunto:

$$d_i = \frac{G_d(x_i) - \bar{G}_d}{\sigma_{G_d}}$$

- ▶ En una distribución gaussiana se calcula la distancia estadística equivalente a la probabilidad límite, $1/2N$, teniendo en cuenta las dos colas.
 - ▶ Por ejemplo, para un conjunto de 10 estaciones cada cola es $1/40 = 0.025$, el límite es $|d_{max}| = 1.96$.

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Método de Chauvenet

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

- ▶ Sean $G_d(x_i)$ las medidas de radiación diaria del conjunto formado por N estaciones.
- ▶ Se calcula la media, \bar{G}_d , la desviación estándar, σ_{G_d} .
- ▶ Se calcula la distancia estadística de cada estación al conjunto:

$$d_i = \frac{G_d(x_i) - \bar{G}_d}{\sigma_{G_d}}$$

- ▶ En una distribución gaussiana se calcula la distancia estadística equivalente a la probabilidad límite, $1/2N$, teniendo en cuenta las dos colas.
 - ▶ Por ejemplo, para un conjunto de 10 estaciones cada cola es $1/40 = 0.025$, el límite es $|d_{max}| = 1.96$.
- ▶ Aquellas observaciones que superan la distancia son marcadas como outliers.

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

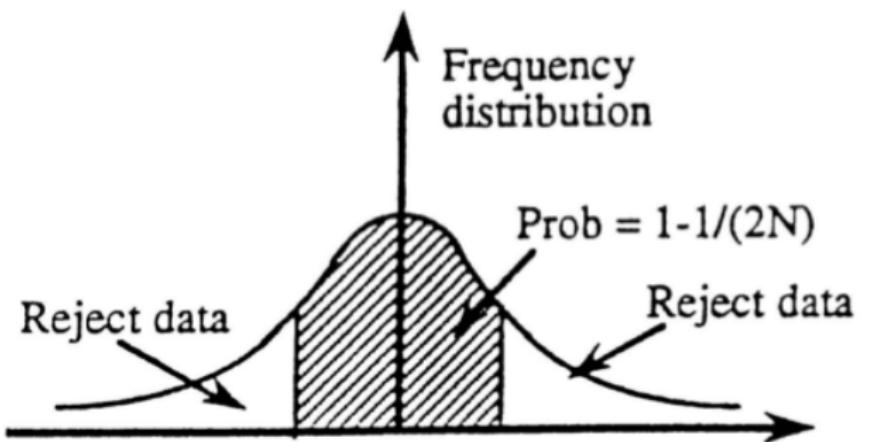
Control de Calidad de
Modelos

Método de Chauvenet

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

$$d_i = \frac{G_d(x_i) - \bar{G}_d}{\sigma_{G_d}}$$

$$|d_i| > |d_{max}|$$



Método de Pierce: más robusto y flexible

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Desviación entre modelo y observación

- ▶ Sea O el conjunto de observaciones (medidas) de una variable aleatoria.

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

- ▶ Sea M el conjunto de resultados de un modelo que aproxima el comportamiento de la variable medida.

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

- ▶ La desviación entre modelo y observación es:

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

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Estimadores frecuentes: MBD y RMSD

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Estimadores frecuentes: MBD y RMSD

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

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

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

- ▶ Root Mean Square Error (RMSD), diferencia cuadrático media:

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Estimadores frecuentes: MBE y RMSD

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- Varianza de la diferencia (unbiased RMSD):

$$\sigma_{\bar{D}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{D})^2$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Estimadores frecuentes: MBE y RMSD

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Varianza de la diferencia (unbiased RMSD):

$$\sigma_{\bar{D}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{D})^2$$

- ▶ El RMSD agrega información del promedio y la varianza de la diferencia:

$$RMSD^2 = \sigma_{\bar{D}}^2 + \bar{D}^2$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Otros estimadores: MAD

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

- ▶ Mean Absolute Deviation (MAD):

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

- ▶ El RMSD no es robusto (un error puntual puede distorsionar el estimador) y depende del número de muestras:

$$MAD \leq RMSD \leq n^{1/2} MAD$$

Otros estimadores: t y d

- ▶ t de Student (valores pequeños indican buen comportamiento del modelo)
 - ▶ Permite añadir intervalos de confianza a las diferencias entre modelo y observación

$$t = \left(\frac{(n - 1)MBD^2}{RMSD^2 - MBD^2} \right)^{1/2}$$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Otros estimadores: t y d

- ▶ t de Student (valores pequeños indican buen comportamiento del modelo)
 - ▶ Permite añadir intervalos de confianza a las diferencias entre modelo y observación

$$t = \left(\frac{(n - 1)MBD^2}{RMSD^2 - MBD^2} \right)^{1/2}$$

- ▶ d_1 : Índice de concordancia de Willmott.
 - ▶ Limitado entre 0 (ausencia de concordancia) y 1 (concordancia total).
 - ▶ Robusto frente a *outliers*.

$$d_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - o_i|}{\sum_{i=1}^n (|m_i - \bar{\mathbf{O}}| + |o_i - \bar{\mathbf{O}}|)}$$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Correlación

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

El coeficiente de correlación entre dos conjuntos de datos es una medida numérica de la relación **lineal** entre los dos conjuntos (si la relación no es lineal, este coeficiente no sirve):

$$r = \frac{1}{n - 1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{o_i - \bar{\mathbf{O}}}{\sigma_{\mathbf{O}}} \right) \cdot \left(\frac{m_i - \bar{\mathbf{M}}}{\sigma_{\mathbf{M}}} \right)$$

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Diagramas de Taylor

- ▶ Desarrollando σ_D^2 y teniendo en cuenta la definición de r :

$$\sigma_D^2 = \sigma_O^2 + \sigma_M^2 - 2 \cdot \sigma_O \cdot \sigma_M \cdot r$$

- ▶ Esta relación es semejante a la ley de los cosenos (c, a, b son lados de un triángulo y ϕ es el ángulo opuesto al lado c):

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cos \phi$$

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

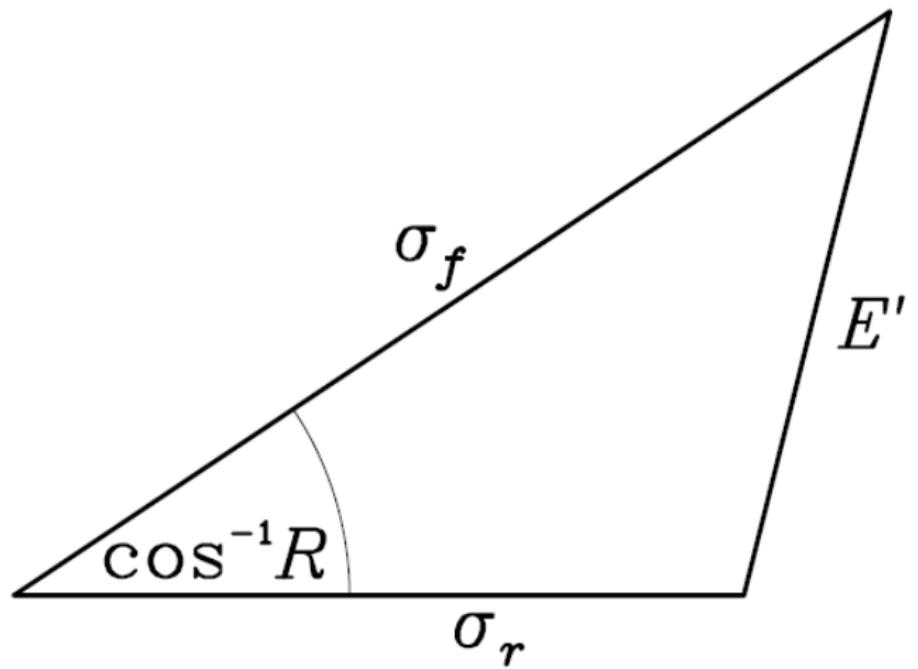
Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Diagramas de Taylor

Energía Solar
Fotovoltaica:
Radiación Solar

Oscar Perpiñán
Lamigueiro
[http://
oscarperpinan.
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

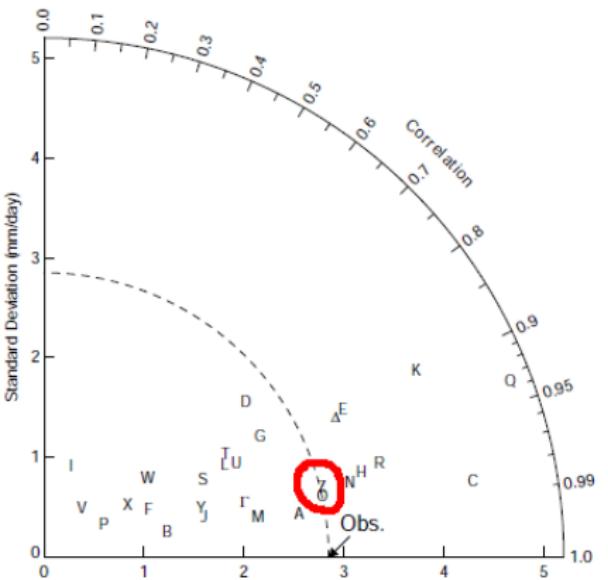
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Diagramas de Taylor

- ▶ σ_D^2 : Distancia al origen
- ▶ σ_O^2 : Eje horizontal
- ▶ σ_M^2 : Eje vertical
- ▶ r : acimut



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística
Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos

Target Diagram

- ▶ Emplea la relación entre $RMSD$, $\sigma_{\mathbf{D}}^2$, y $\overline{\mathbf{D}}$, normalizadas con $\sigma_{\mathbf{O}}$:

$$RMSD' = RMSD / \sigma_{\mathbf{O}}$$

$$\sigma'_{\mathbf{D}} = \sigma_{\mathbf{D}} / \sigma_{\mathbf{O}}$$

$$\overline{\mathbf{D}}' = \overline{\mathbf{D}} / \sigma_{\mathbf{O}}$$

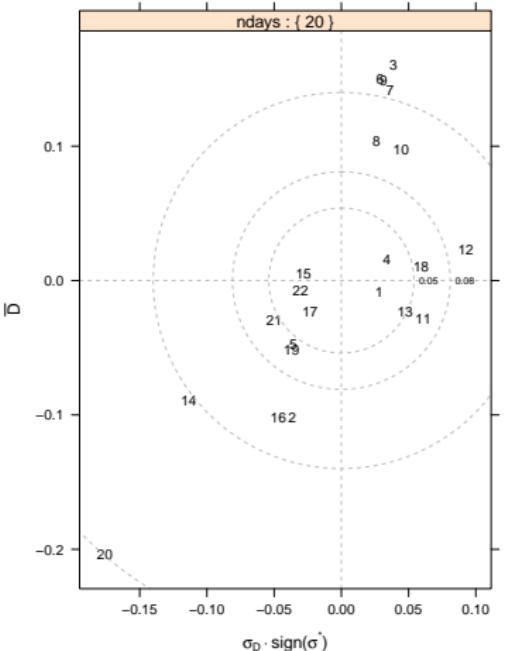
$$RMSD'^2 = \sigma'^2_{\mathbf{D}} + \overline{\mathbf{D}}'^2$$

$$sign_{\sigma} = (\sigma_{\mathbf{M}} - \sigma_{\mathbf{O}})$$

- ▶ Incorporan el signo de la diferencia entre desviaciones estándar de modelo y observación:

Target Diagram

- ▶ σ'_D (con signo): Eje horizontal
- ▶ \bar{D}' : Eje vertical
- ▶ $RMSD'^2$: Distancia al origen



Naturaleza de la
radiación solar

Cálculo de
componentes de
radiación solar

Cálculo de
radiación sobre
generadores

Radiación Efectiva
según tipologías

Aplicación a
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de
Medidas

Control de Calidad de
Modelos