

# 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

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

**Irradiancia** es la densidad de *potencia* de radiación 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:  $\frac{Wh}{m^2}$ ,  $\frac{kWh}{m^2}$

# Radiación Extra-atmosférica

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**
  - ▶  $B_0(0) = B_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \cos \theta_{zs}$
  - ▶  $B_{0d}(0) = -\frac{T}{\pi} B_0 \epsilon_0 \cdot (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)$   
( $\omega_s$  en radianes)

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

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

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

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

# Interacción de la radiación con la atmósfera

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

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

# Componentes de la radiación solar

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)

Cálculo de  
radiación sobre  
generadores

## ► Radiación Global: $G = B + D + R$

Radiación Efectiva  
según tipologías

Aplicación a  
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

# Cómo se escribe

## Forma, tiempo, lugar

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

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

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

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

$Forma_{tiempo,promedio}(lugar)$

$G_{d,m}(0)$

$D_h(\alpha, \beta)$

$B_{0d}(n)$

$B(\beta)$

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

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

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

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 **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**.

# Estimación de Directa y Difusa

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

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

# Correlaciones $F_D$ y $K_T$ : Ecuación de Page

Radiación Solar

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

Naturaleza de la  
radiación solar

Cálculo de  
componentes de  
radiación solar

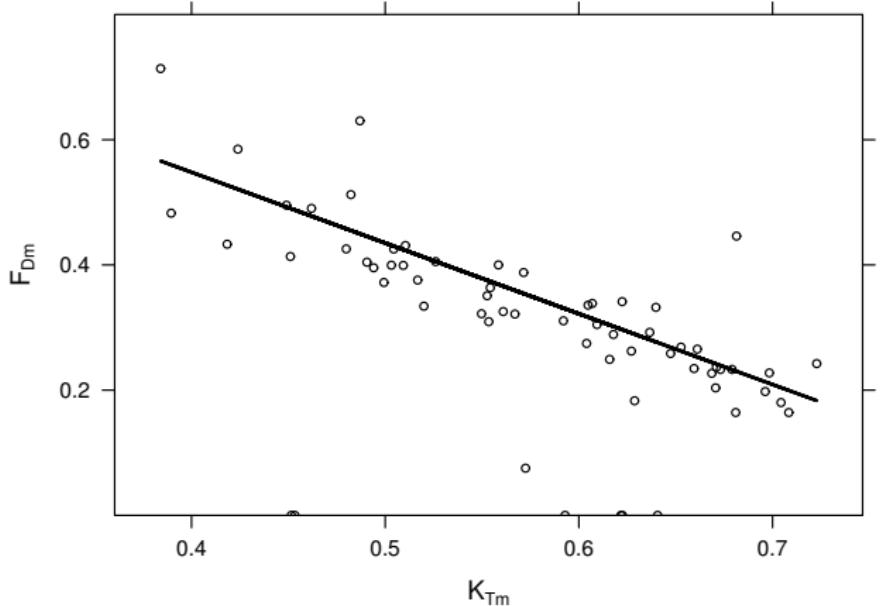
Cálculo de  
radiación sobre  
generadores

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

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 $K_T$ : Collares-Pereira y Rabl

Radiación Solar

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

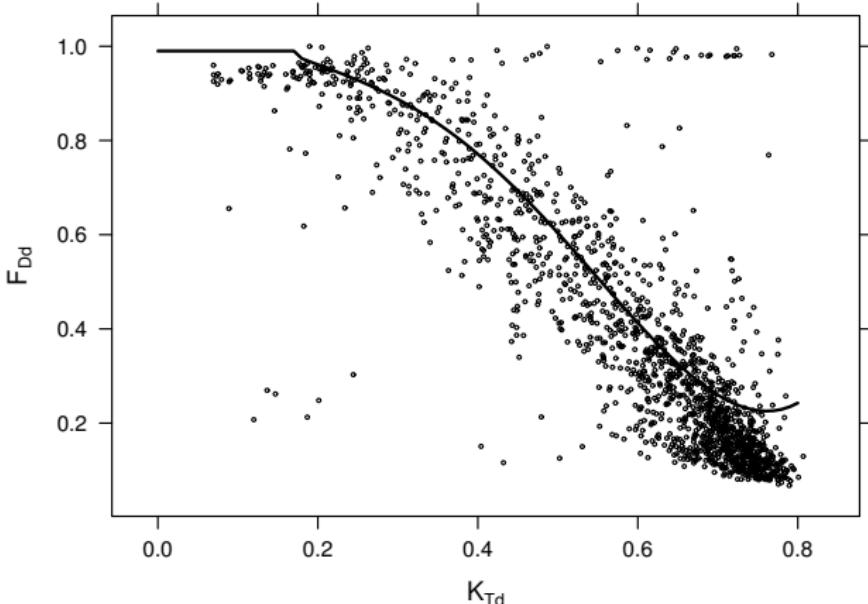
Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



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

# Estimación de Directa y Difusa

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

**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

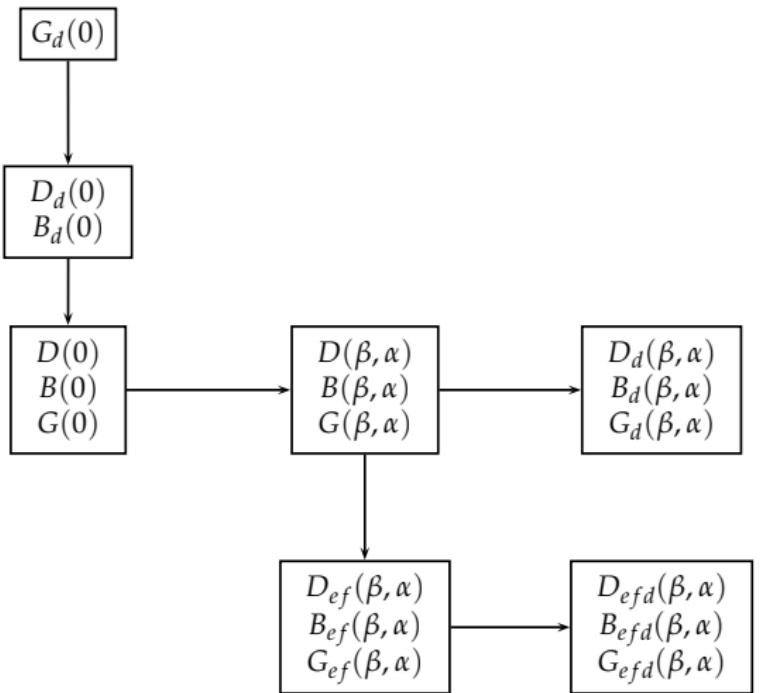
Bases de Datos

Control de Calidad

# Irradiancia sobre superficies arbitrarias

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

- ▶ 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

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

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

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

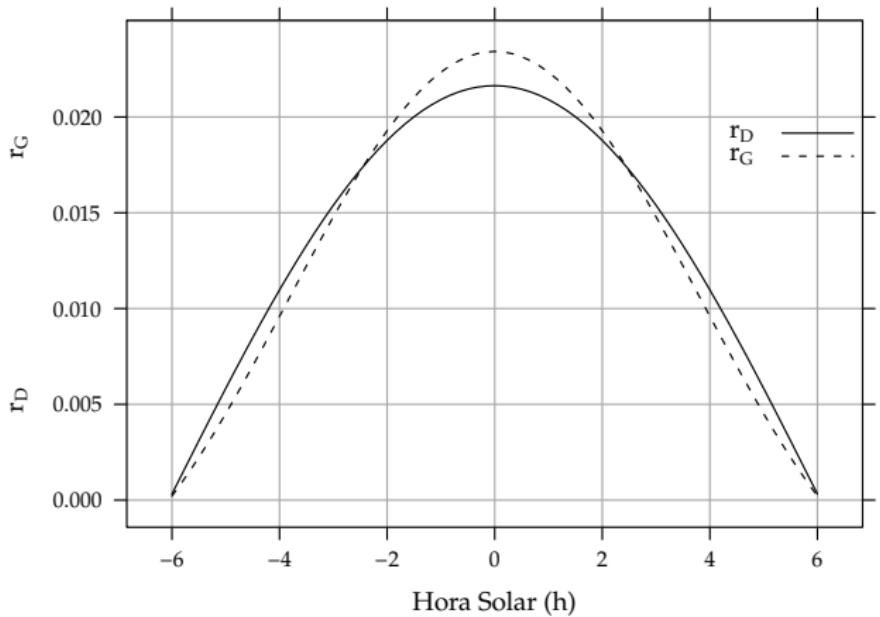
$$a = 0.409 - 0.5016 \cdot \sin\left(\omega_s + \frac{\pi}{3}\right)$$

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

# Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

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

# Estimación de Irradiancia a partir de Irradiación diaria

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

**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

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

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

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

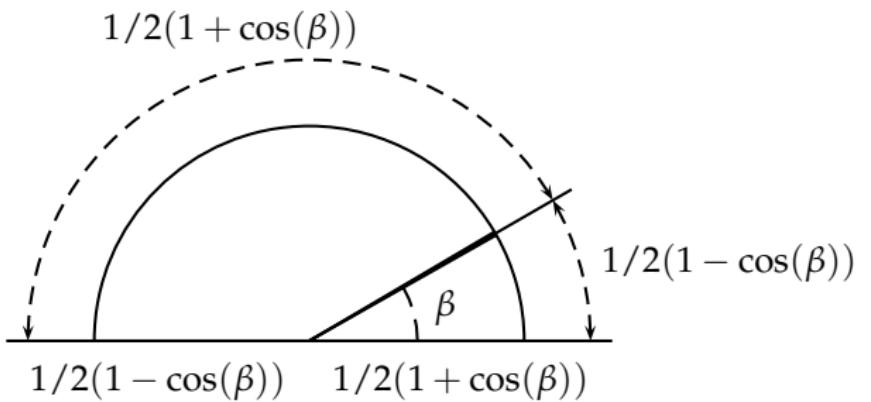
Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



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

# Irradiancia Difusa isotrópica

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

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

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

# Irradiancia 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

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

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

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

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

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

# Irradiancia de Albedo

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

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

$$\rho = 0.2$$

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  
suciedad

Radiación Efectiva  
según tipologías

Aplicación a  
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

# Irradiancia sobre plano inclinado

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

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

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

# Radiación directa

Radiación Solar

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

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

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

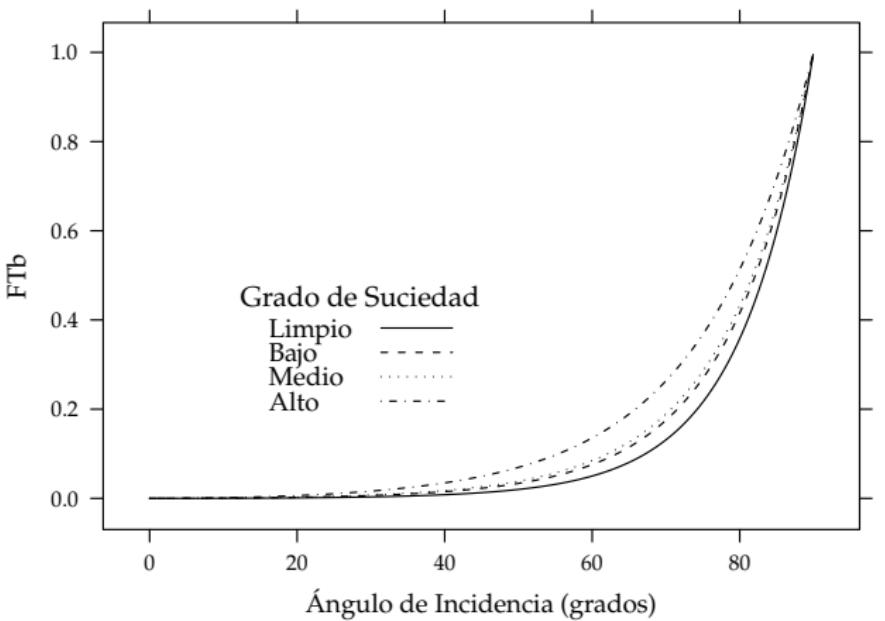
Pérdidas angulares y por suciedad

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



# Difusa y Albedo

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

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

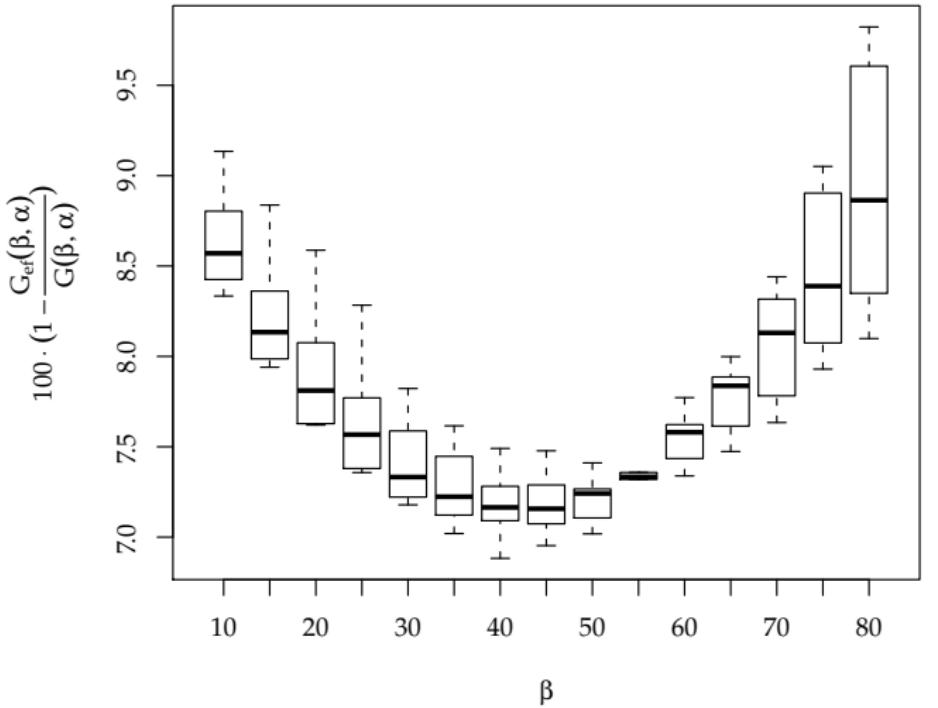
Control de Calidad

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

# Pérdidas anuales

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

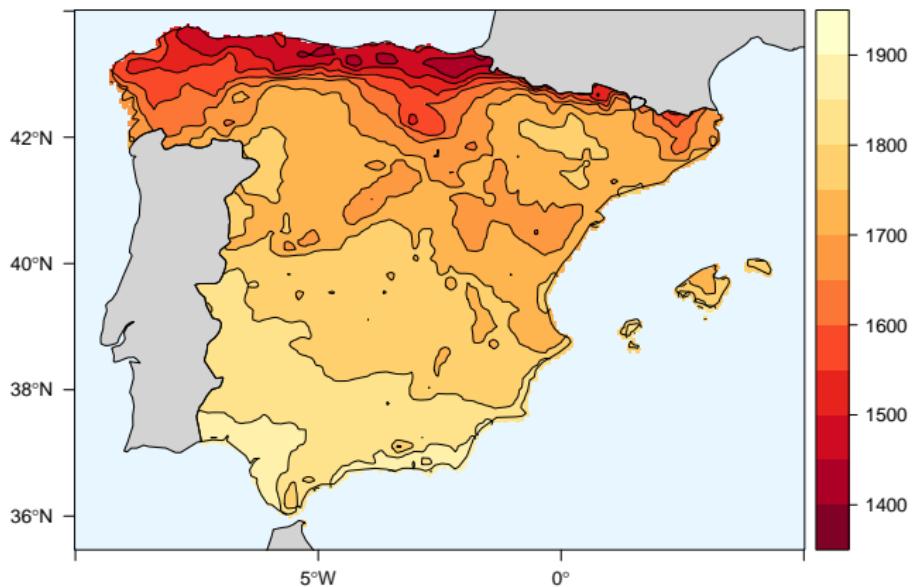
Bases de Datos

Control de Calidad

# Radiación en Sistema estático

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

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

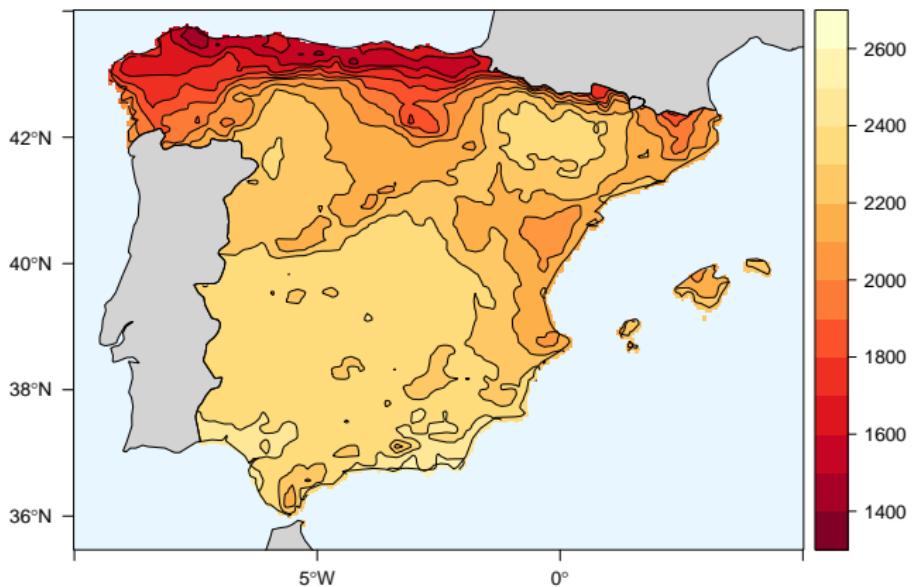
Radiación Efectiva según tipologías

Comparación entre tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

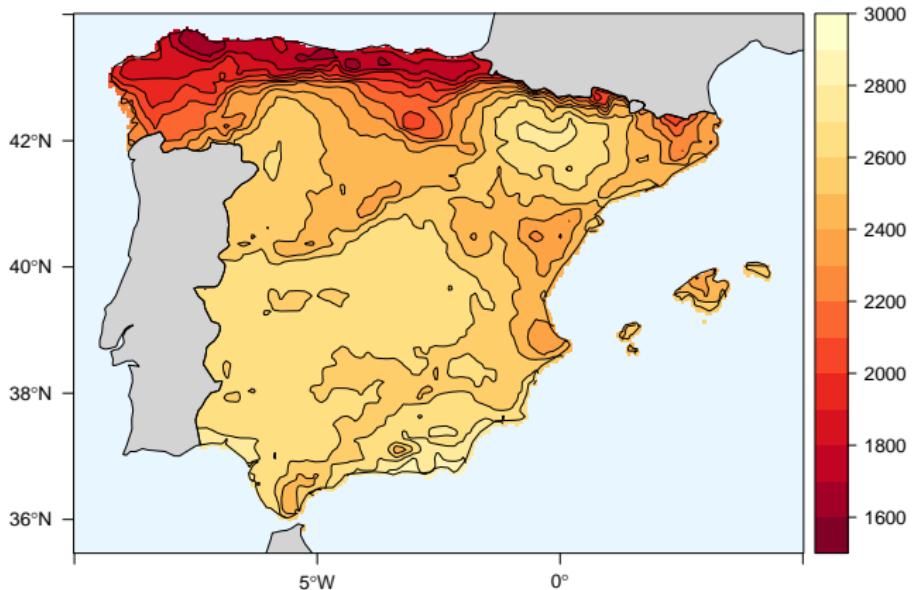
Control de Calidad



# Radiación en Seguimiento Doble Eje

## Radiación Solar

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



## Radiación Efectiva según tipologías

## Comparación entre tipologías

## 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

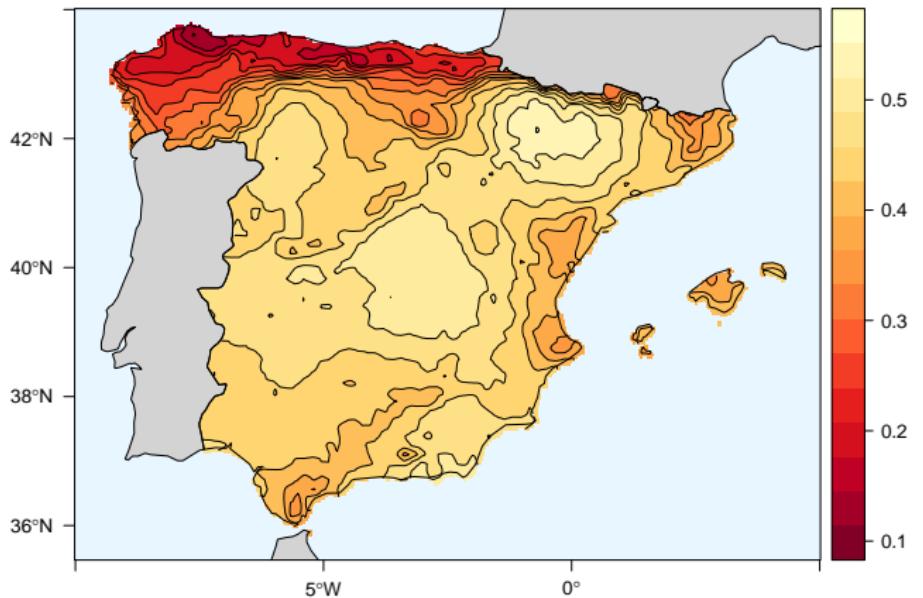
Bases de Datos

Control de Calidad

# Comparación Doble Eje-Estática

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

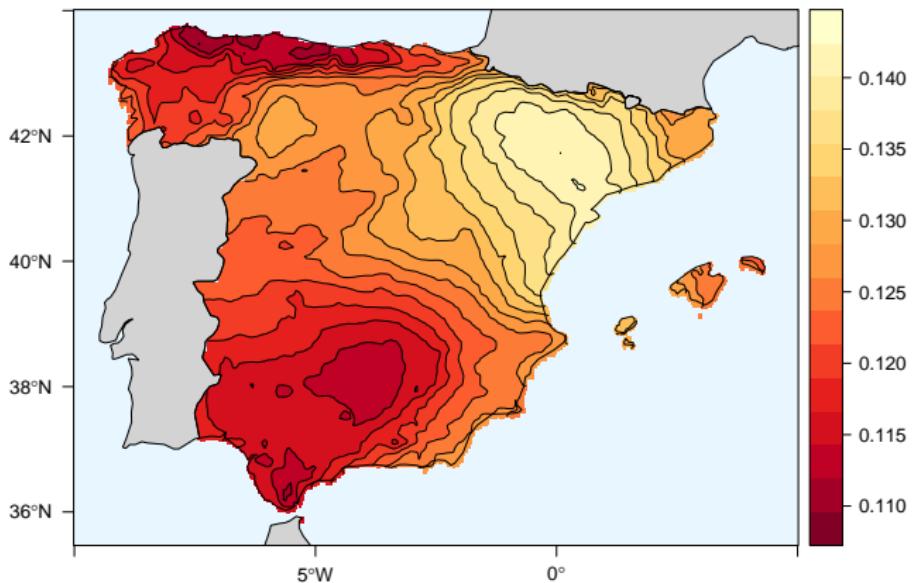
Bases de Datos

Control de Calidad

## Comparación Doble Eje - Horizontal

## Radiación Solar

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



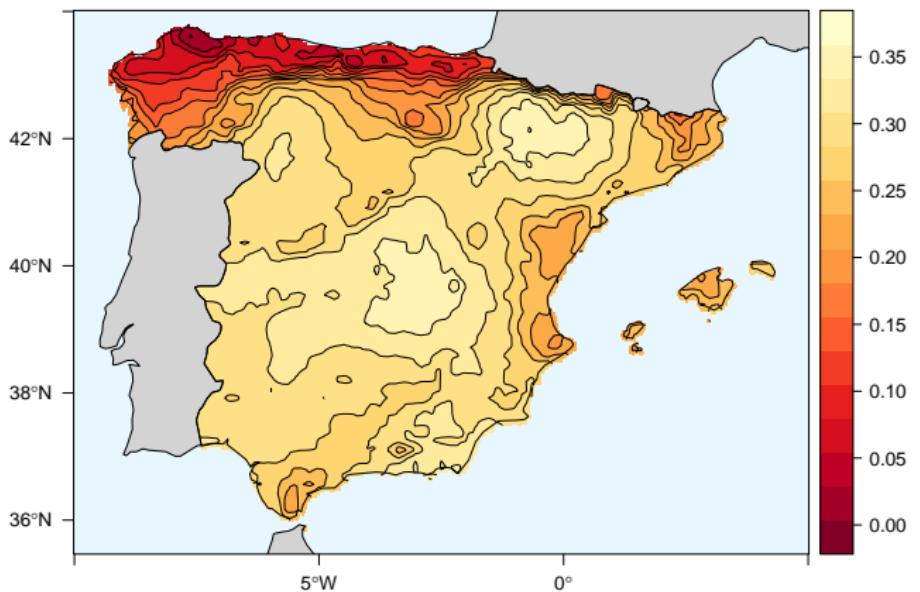
## Comparación entre tipologías

Control de Calidad

# Comparación Eje Horizontal - Estática

## Radiación Solar

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



## Comparación entre tipologías

Control de Calidad

# Comparación entre Sistemas

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

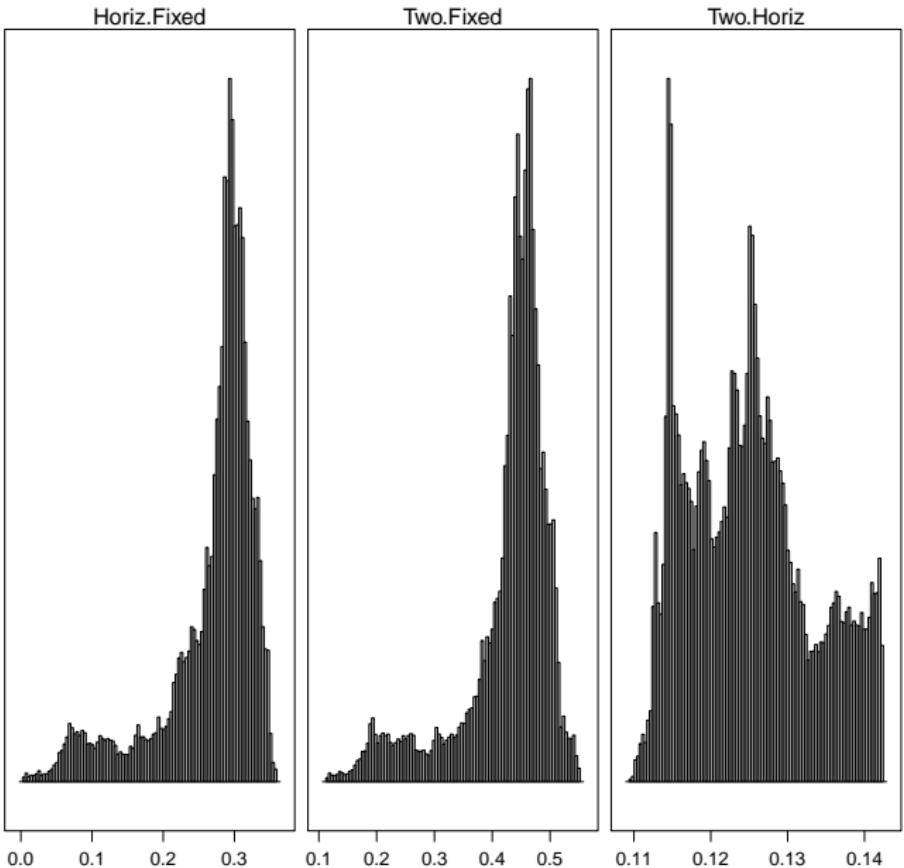
Radiación Efectiva  
según tipologías

Comparación entre  
tipologías

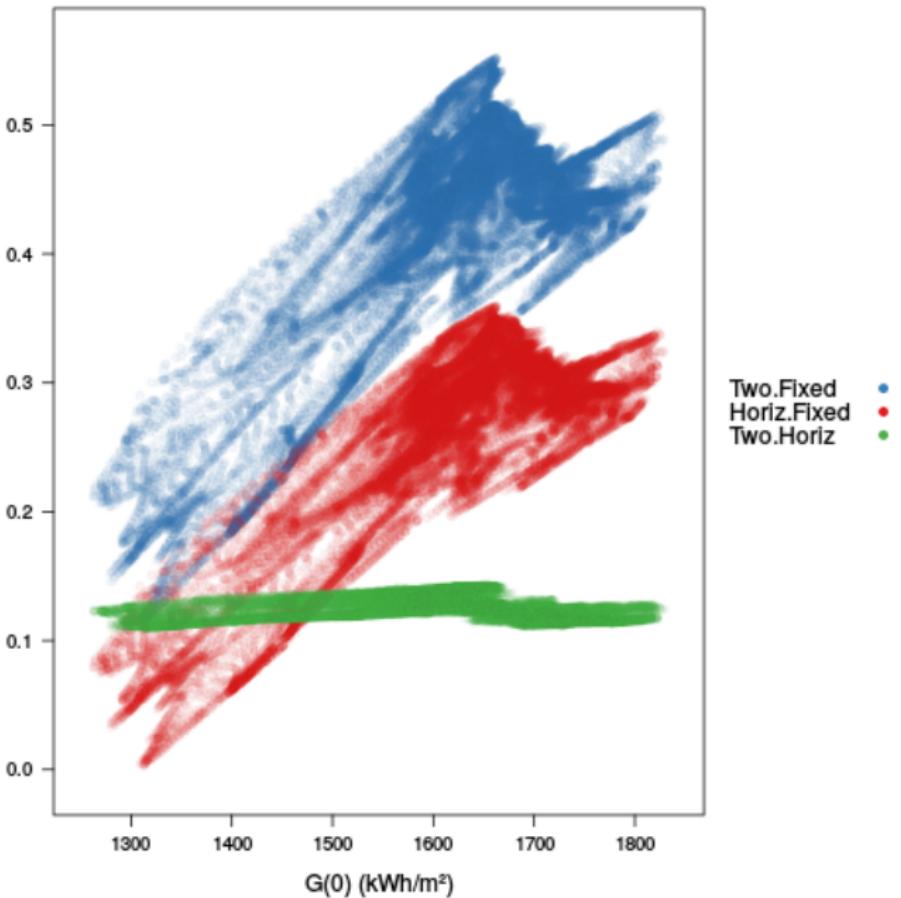
Aplicación a  
Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad



# Comparación entre Sistemas



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

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

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

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

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

# Sensibilidad al desapuntamiento

Radiación Solar

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

Naturaleza de la  
radiación solar

Cálculo de  
componentes de  
radiación solar

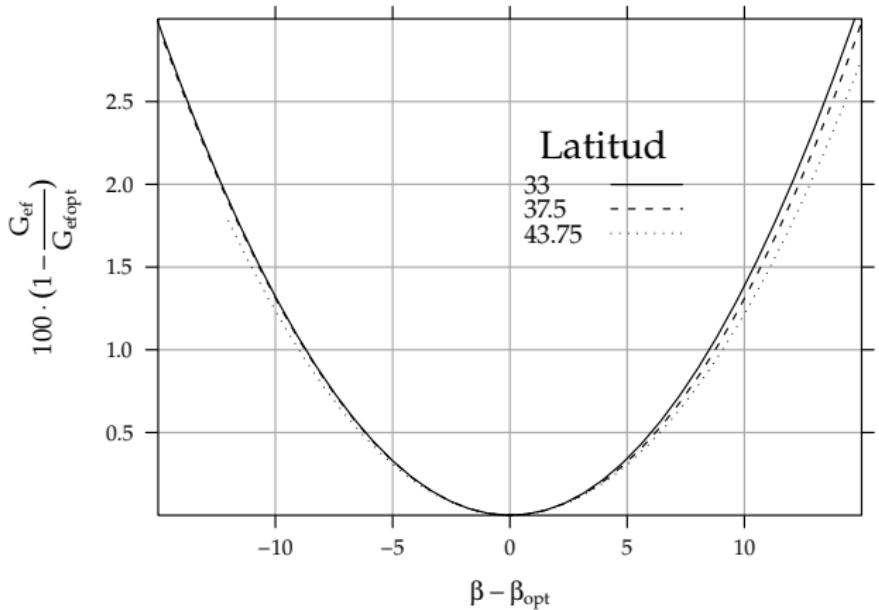
Cálculo de  
radiación sobre  
generadores

Radiación Efectiva  
según tipologías

Aplicación a  
Sistemas estáticos  
Ángulo de inclinación  
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad



# Radiación para inclinación óptima

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

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

# Cálculo de Radiación Efectiva

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

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

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

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

Naturaleza de la  
radiación solarCálculo de  
componentes de  
radiación solarCálculo de  
radiación sobre  
generadoresRadiación Efectiva  
según tipologíasAplicación a  
Sistemas estáticos  
Ángulo de inclinación  
óptimo

Bases de Datos

Control de Calidad

# Cálculo para estática

**Calcular** la irradiación anual efectiva que incide en

- ▶ Un generador orientado al Sur e inclinado  $20^\circ$  en un lugar con latitud  $30^\circ\text{N}$  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  $20^\circ$  del Sur e inclinado  $40^\circ$  en un lugar con latitud  $50^\circ\text{N}$  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

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

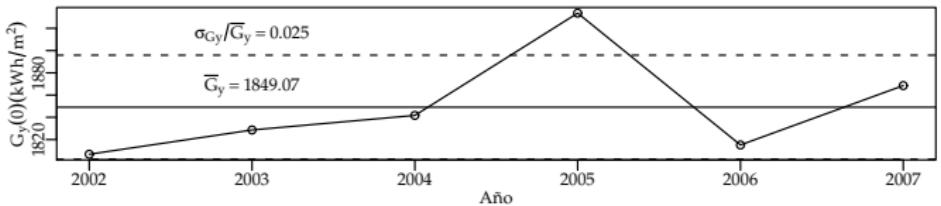
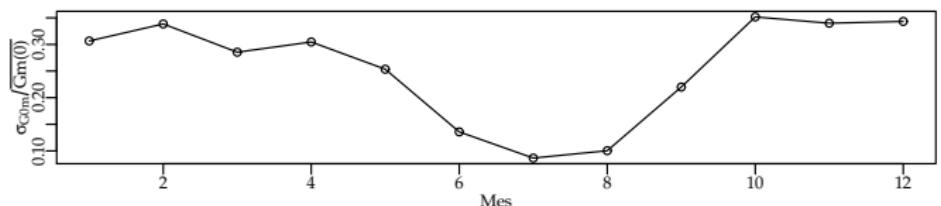
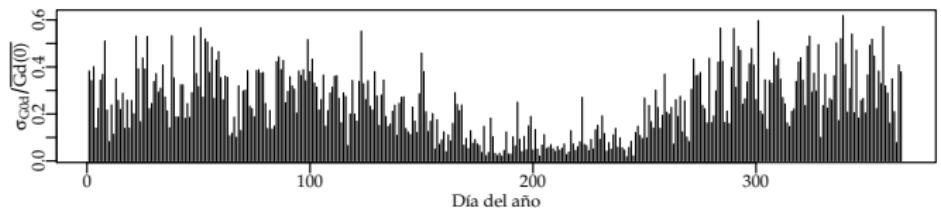
Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

# 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>

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

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

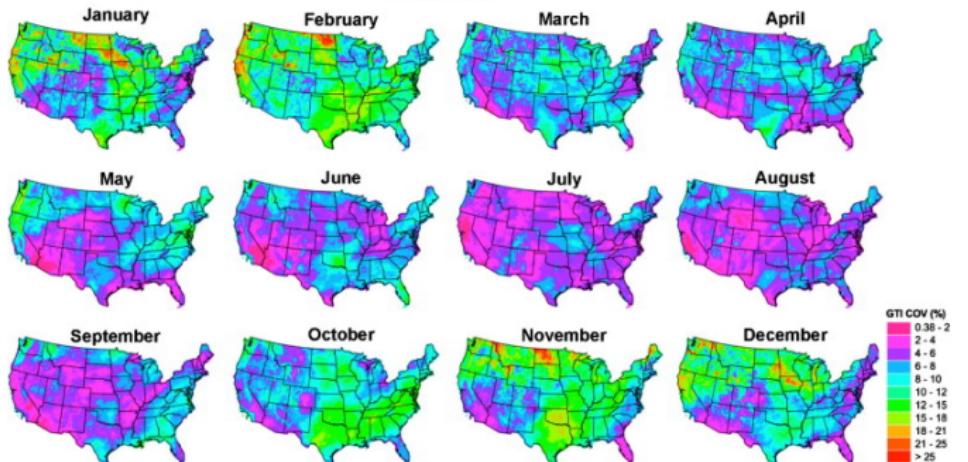
Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

# Variabilidad Espacial

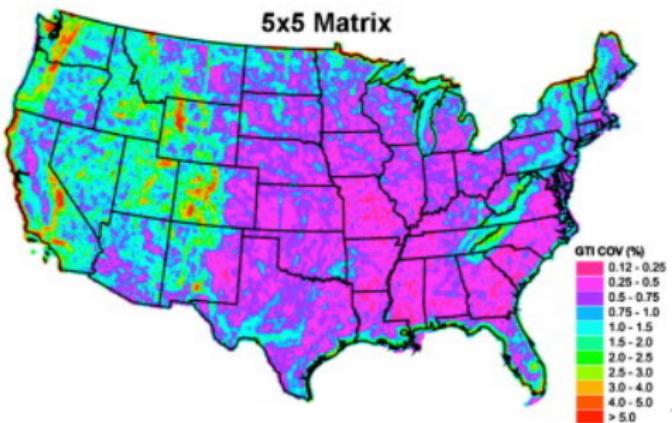
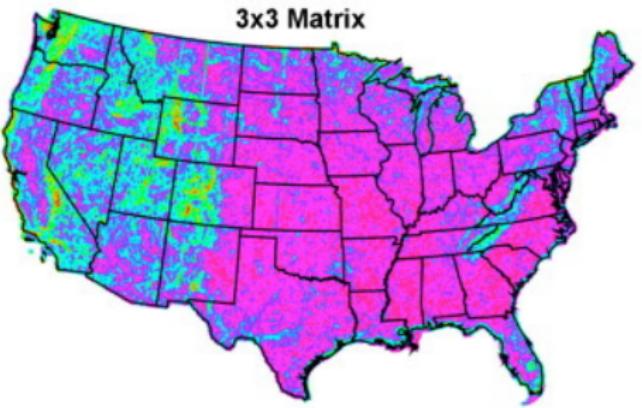
Monthly GTI Interannual COV (%)  
1998-2005



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

# Variabilidad Espacial

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



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

# Estimación a partir de Medidas

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

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).

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).

## ► 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

# 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).

## ► Imágenes de satélite

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

## ► 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

Radiación Solar

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

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.

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

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.
- ▶ Respuestaperfecta 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

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).

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

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

# 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.

# Estaciones Meteorológicas: modelos empíricos

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

- 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

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

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.



# 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**.

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

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**.

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.

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**

# Procedimientos: LSA SAF

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

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

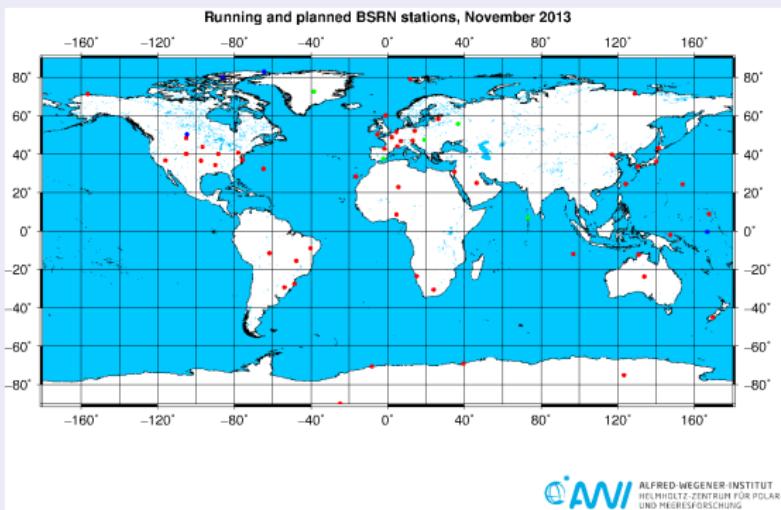
Métodos híbridos

Control de Calidad

# 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.



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

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

# Measurement and Instrumentation Data Center NREL

Radiación Solar

Oscar Perpiñán Lamigueiro  
<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



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

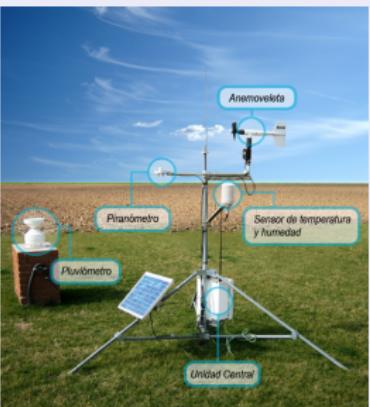
Métodos híbridos

Control de Calidad



## Sensores

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



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

# Redes de Comunidades Autónomas

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

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

Control de Calidad

## 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

- ▶ **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.

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

# SAFs: Radiación

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

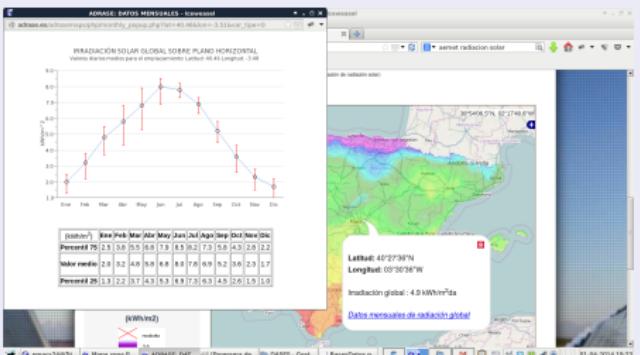
Fuentes de Datos:  
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad

- ▶ Radiación 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)



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.

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

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

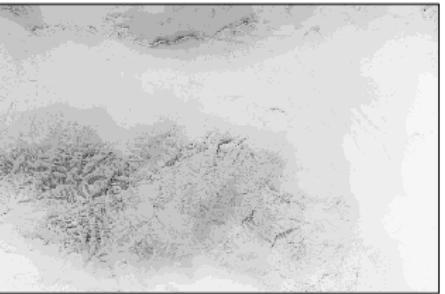
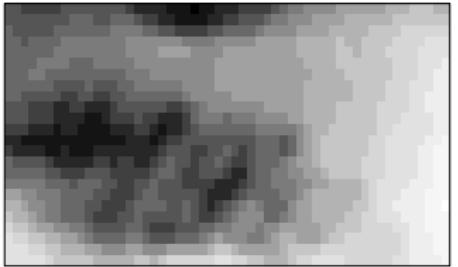
Imágenes de Satélite

Fuentes de Datos:  
Estaciones Terrestres

Fuentes de Datos: Satélite

Métodos híbridos

Control de Calidad



**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

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.

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

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

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

# Función de densidad de probabilidad

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

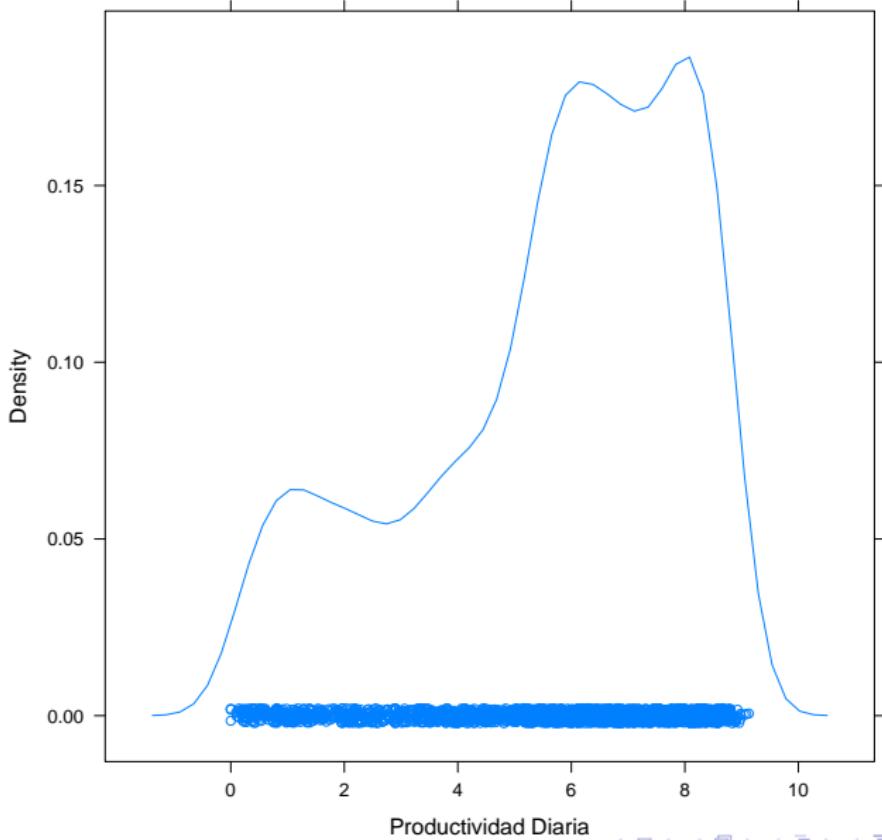
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

# Función de Densidad de Probabilidad

## Funcion de densidad de probabilidad



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

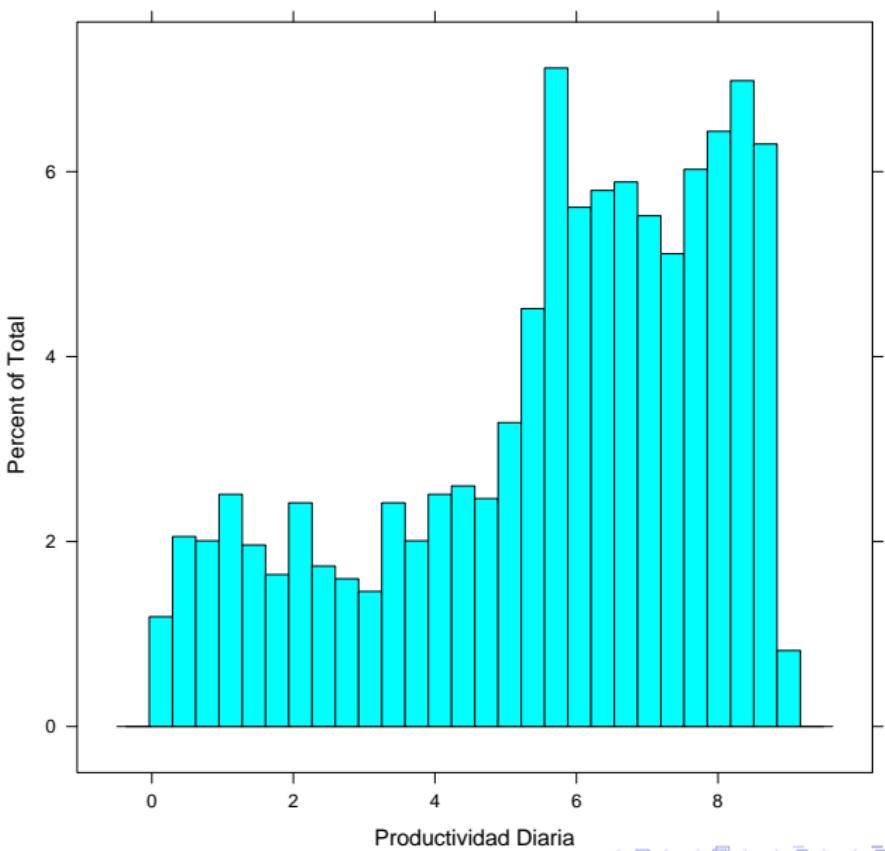
Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

Control de Calidad de  
Modelos

# Histograma

Histograma



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

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

# Media, varianza y desviación estándar

- ▶ 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 raíz cuadrada de la varianza:  $\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$

# Combinación lineal de variables aleatorias

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

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

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

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

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

# Media y varianza de la media muestral

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

- ▶ 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  $\mu$  y su varianza es  $\sigma^2$ , entonces la media de la muestra es otra variable aleatoria (que es una suma de variables aleatorias)

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

# Media y varianza de la media muestral

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

- ▶ 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**.

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.

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

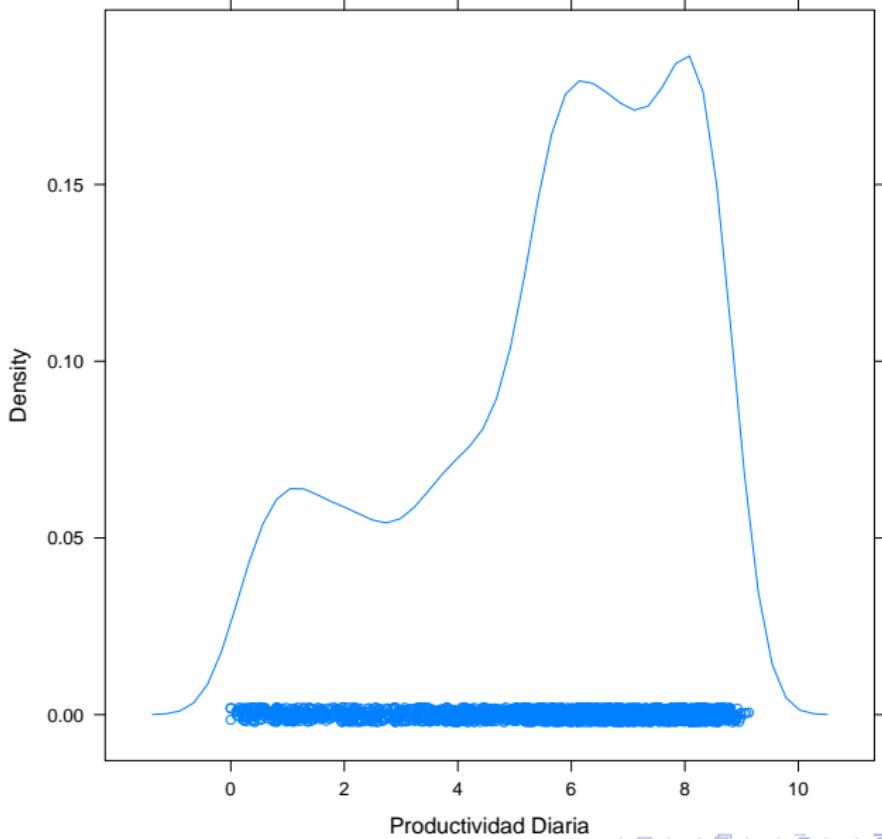
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

# Función de Densidad de Probabilidad

## Funcion de densidad de probabilidad



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

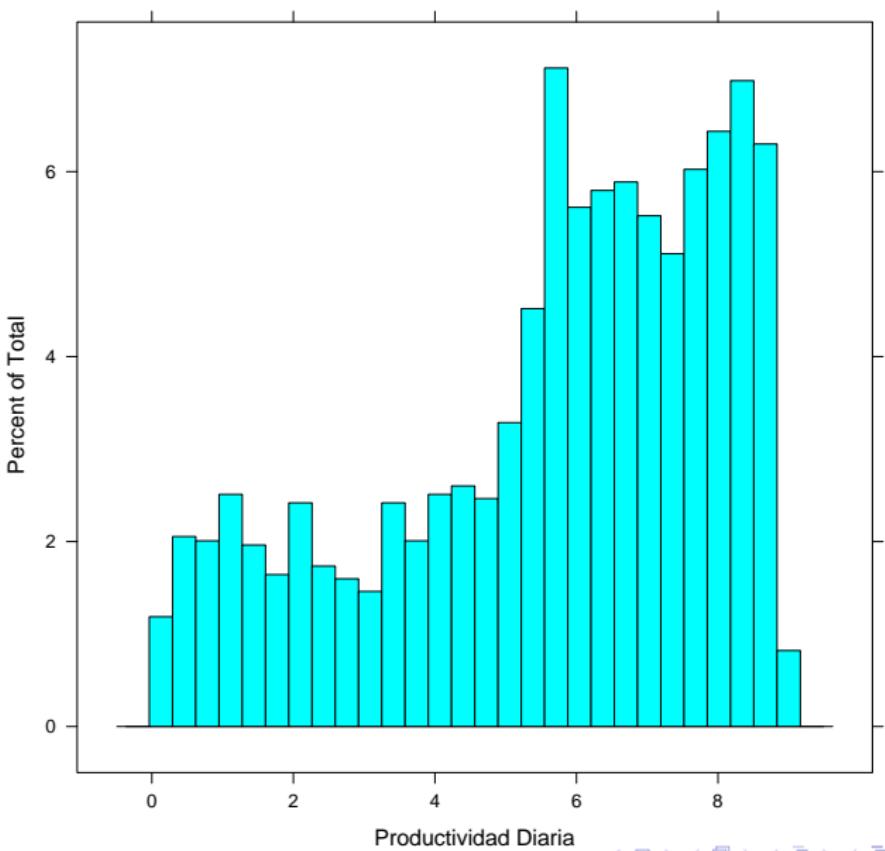
Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

Control de Calidad de  
Modelos

# Histograma

Histograma



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

Estadística

Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

Control de Calidad de  
Modelos

# Gráficos boxplot

Radiación Solar

Oscar Perpiñán

Lamigueiro

<http://>

[oscarperpinan.](https://oscarperpinan.github.io)

[github.io](https://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

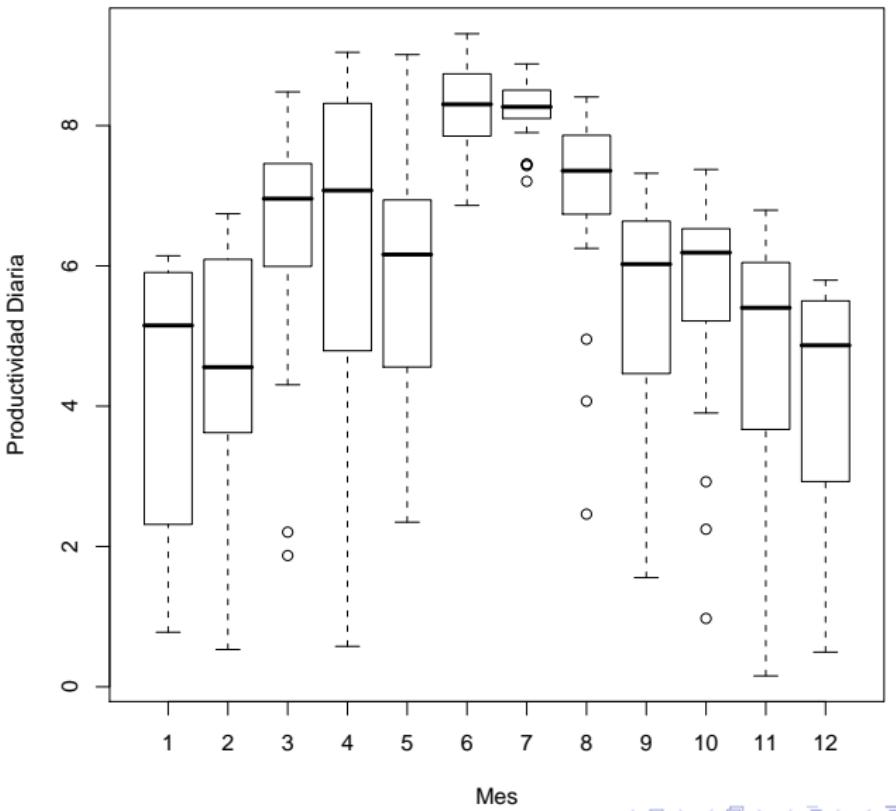
Estadística

Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

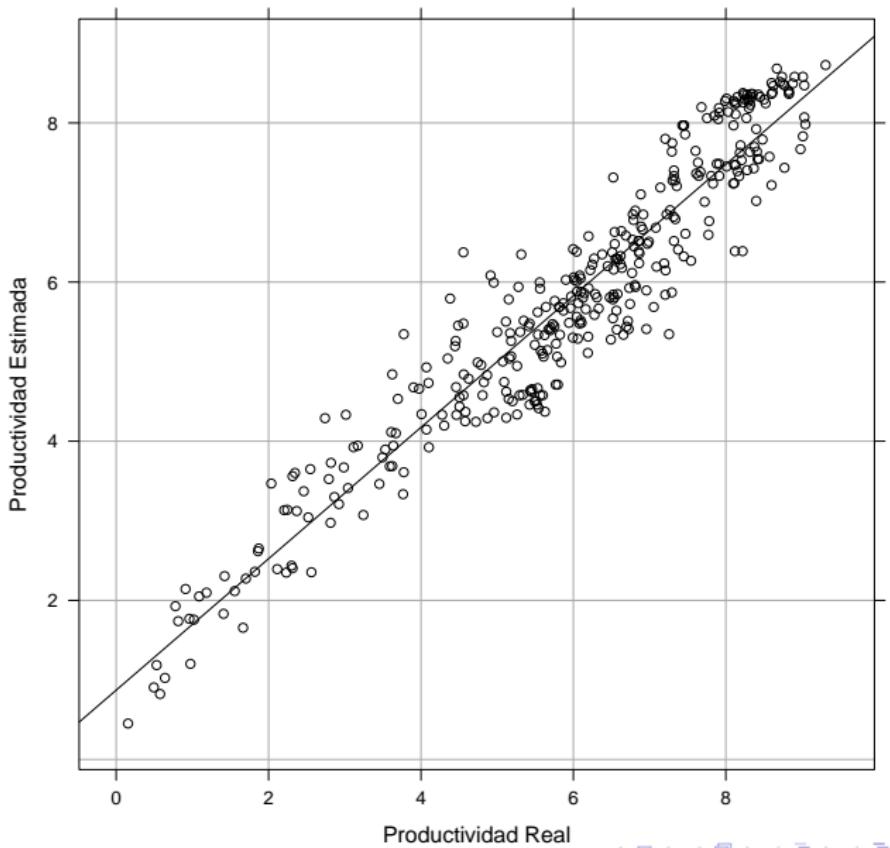
Control de Calidad de  
Modelos

Variabilidad Mensual de la Productividad diaria



# Gráficos de dispersión

## Estimación de Productividad Diaria



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

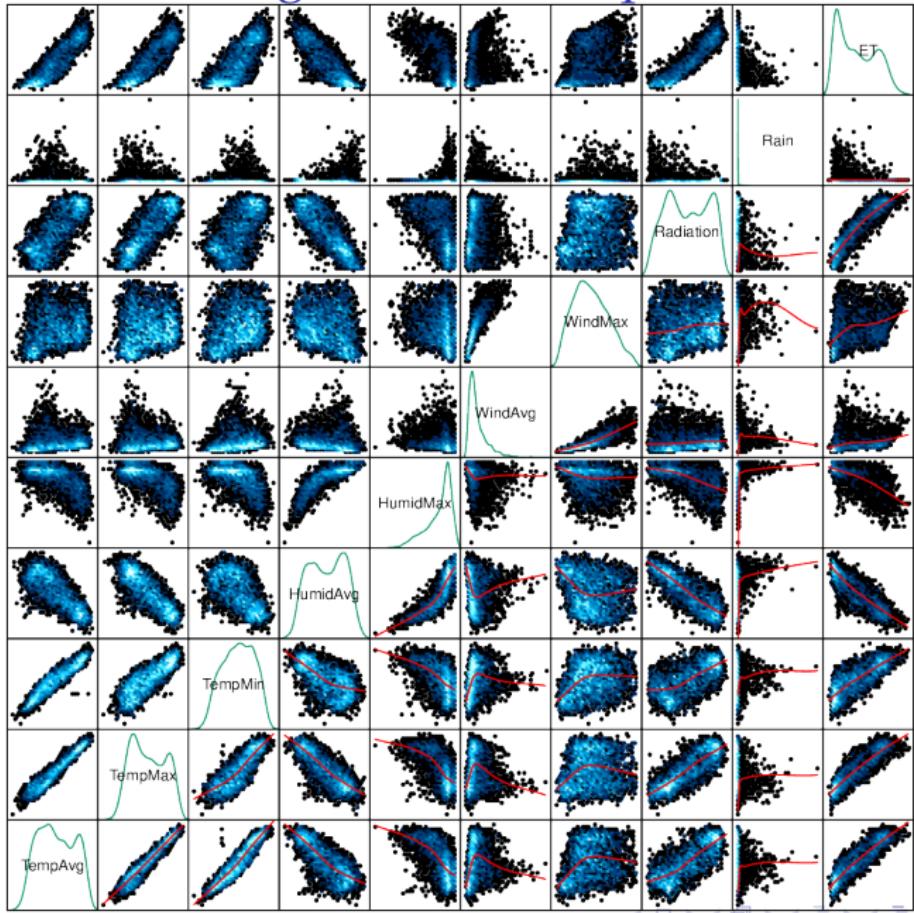
Estadística

Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

Control de Calidad de  
Modelos

# Matrices de gráficos de dispersión



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

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

# Límites físicos

## 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

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

# Límites físicos

## 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)

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

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

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 persistencia

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 de irradiancia

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

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

# Tests de rampas

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

Límites a las variaciones de la irradiancia entre  
instantes sucesivos

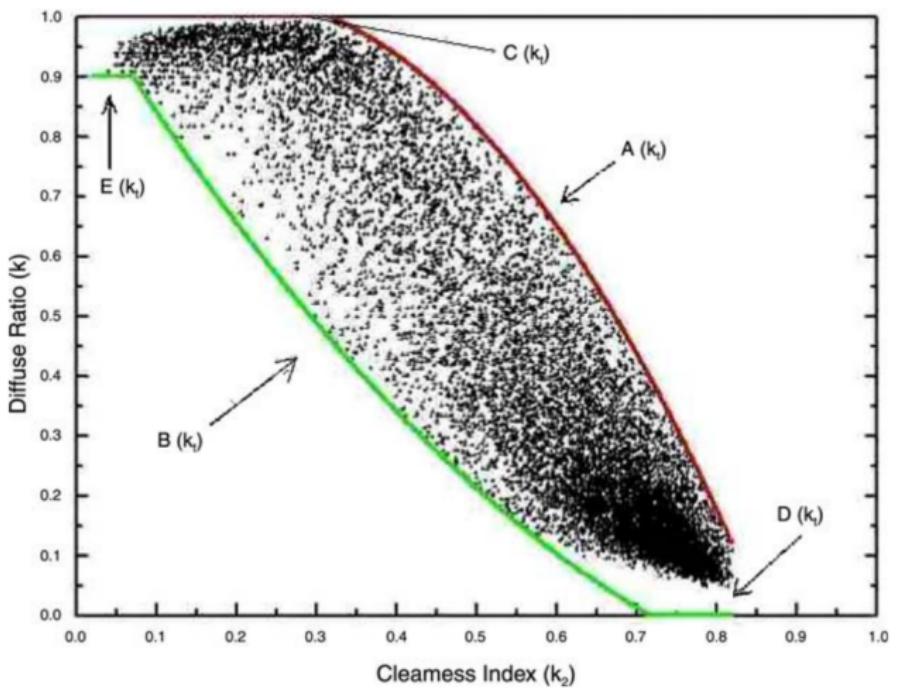
$$|k_t(t) - k_t(t-1)| < 0.75 \text{ si } \gamma_s(t) > 2^\circ$$

## Tests de enveloppe

## Radiación Solar

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

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



# Coherencia espacial

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

# 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,  $G_d(x_0)$ .

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

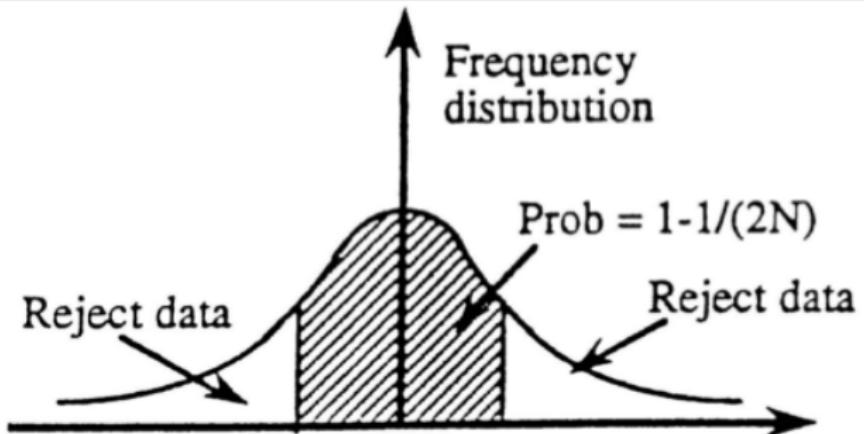
- ▶ La diferencia absoluta debe estar por debajo de un límite (p.ej. 50%)

# 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.



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.

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,  $\sigma_{G_d}$ .

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,  $\sigma_{G_d}$ .
- ▶ Se calcula la distancia estadística de cada estación al conjunto:

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

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

# 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,  $\sigma_{G_d}$ .
- ▶ 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  $|d_{max}| = 1.96$ .

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,  $\sigma_{G_d}$ .
- ▶ 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.

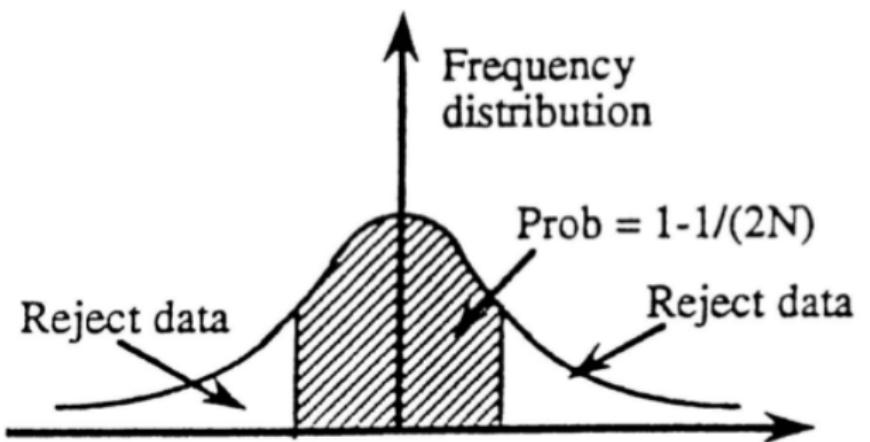
# Método de Chauvenet

Radiación Solar

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

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

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



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 Pierce: más robusto y flexible

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:

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

# Estimadores frecuentes: MBD y RMSD

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

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 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:

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

# Estimadores frecuentes: MBE y RMSD

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: MBE y RMSD

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

- ▶ 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:

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

# Otros estimadores: MAD

- ▶ 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:

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

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

# 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

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

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*.

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

# Correlación

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  $\sigma_D^2$  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  $\phi$  es el ángulo opuesto al lado  $c$ ):

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

Naturaleza de la radiación solar

Cálculo de componentes de radiación solar

Cálculo de radiación sobre generadores

Radiación Efectiva según tipologías

Aplicación a Sistemas estáticos

Bases de Datos

Control de Calidad

Estadística  
Gráficos

Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

# Diagramas de Taylor

Radiación Solar

Oscar Perpiñán

Lamigueiro

<http://>

[oscarperpinan.github.io](https://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

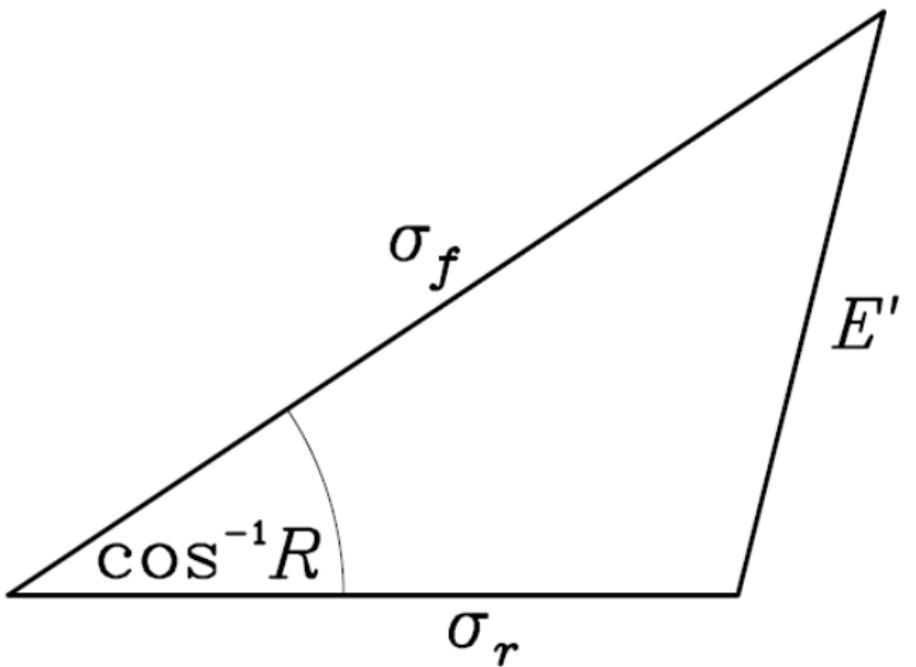
Control de Calidad

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

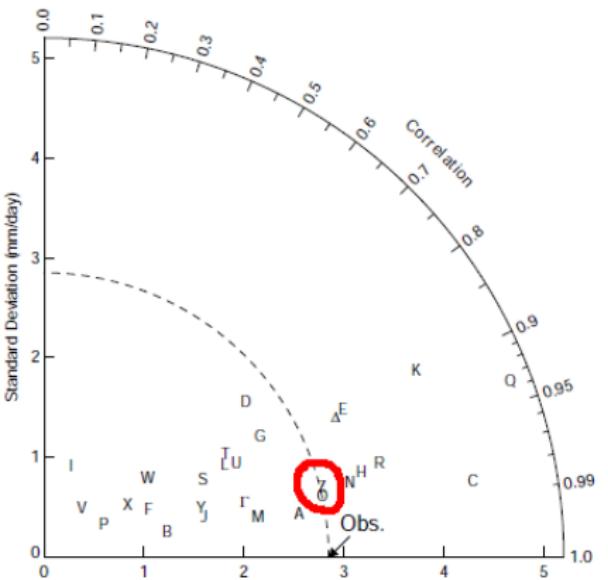
Gráficos

Control de Calidad de  
Medidas

Control de Calidad de  
Modelos

# Diagramas de Taylor

- ▶  $\sigma_D^2$ : Distancia al origen
- ▶  $\sigma_O^2$ : Eje horizontal
- ▶  $\sigma_M^2$ : Eje vertical
- ▶  $r$ : acimut



# Target Diagram

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

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

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

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

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

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

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

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

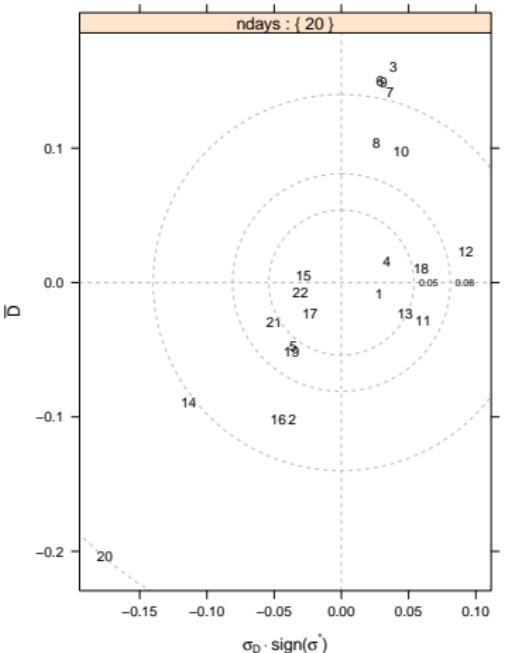
Control de Calidad de Medidas

Control de Calidad de Modelos

# Target Diagram

## Radiación Solar

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



Estadística

## Gráficos

## Control de Calidad de Medidas

## Control de Calidad de Modelos