

Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre

Modelos físicos e híbridos utilizando
información satelital sobre la Pampa Húmeda

Agustín Laguarda Cirigliano

agu.laguarda@gmail.com



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR

Contexto local



Modelos satelitales



Modelos satelitales

A satellite view of Earth from space, showing a large body of water (ocean) and a coastline. In the upper left corner, a satellite component, possibly a solar panel array, is visible. The background is a deep blue space.

estadísticos/empíricos

- pueden alcanzar gran precisión
- necesitan ser entrenados con periodicidad
- resultados locales (no extrapolables)

Modelos satelitales



estadísticos/empíricos

- pueden alcanzar gran precisión
- necesitan ser entrenados con periodicidad
- resultados locales (no extrapolables)

modelo actual (JPTv2):

- solo provee GHI
(con parametrizaciones adicionales para DNI)
- ~3% de valores negativos (físicamente incons.)
- incertidumbre horaria <13%

Modelos satelitales



estadísticos/empíricos

- pueden alcanzar gran precisión
- necesitan ser entrenados con periodicidad
- resultados locales (no extrapolables)

modelo actual (JPTv2):

- solo provee GHI
(con parametrizaciones adicionales para DNI)
- ~3% de valores negativos (físicamente incons.)
- incertidumbre horaria <13%

físicos

- dan información sobre procesos en la atmósfera
- universales, sin entrenamiento
- mayor complejidad
- necesitan conocer estado de la atmósfera
- modelos de transferencia radiante (RTM)

Modelos satelitales

estadísticos/empíricos

- pueden alcanzar gran precisión
- necesitan ser entrenados con periodicidad
- resultados locales (no extrapolables)

modelo actual (JPTv2):

- solo provee GHI
(con parametrizaciones adicionales para DNI)
- ~3% de valores negativos (físicamente incons.)
- incertidumbre horaria <13%

físicos

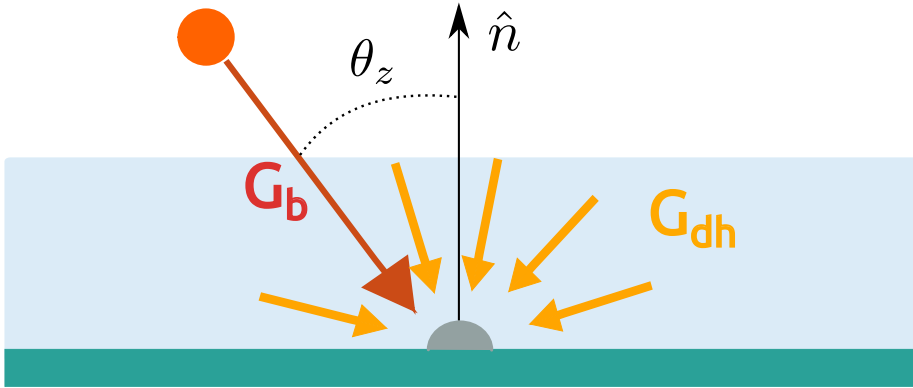
- dan información sobre procesos en la atmósfera
- universales, sin entrenamiento
- mayor complejidad
- necesitan conocer estado de la atmósfera
- modelos de transferencia radiante (RTM)

híbridos/semi-empíricos

- base física (requiere info. atmosférica)
- algunos procesos atmosféricos se parametrizan
- menos parámetros ajustados
- mayor conocimiento de procesos intermedios

Definiciones básicas

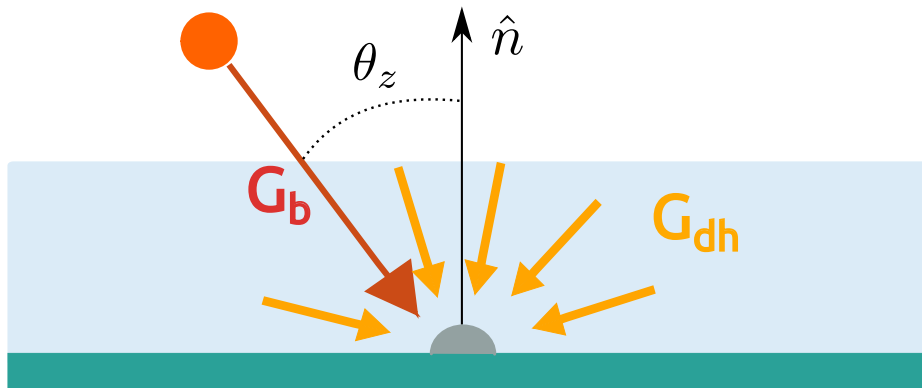
Componentes de la radiación solar (280-3000nm)



	DNI irradiancia directa en incidencia normal	DHI irradiancia difusa en un plano horizontal	GHI irradiancia global en un plano horizontal
irradiancia (W/m ²)	G_b	G_{dh}	G_h
irradiación horaria (Wh/m ²)	I_b	I_{dh}	I_h

Definiciones básicas

Componentes de la radiación solar (280-3000nm)

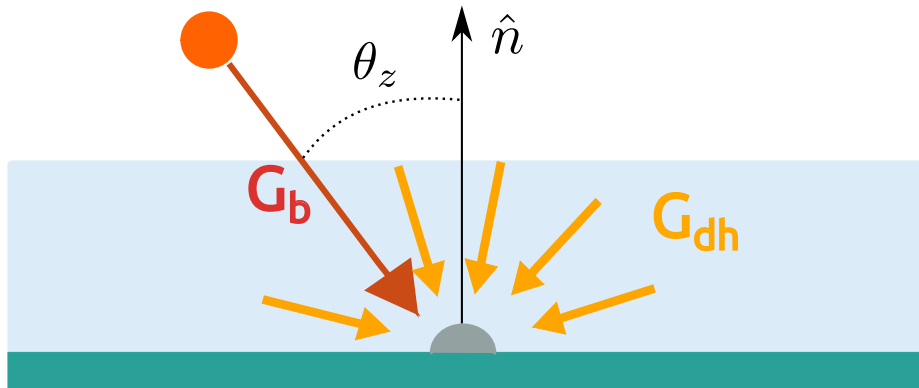


relación de clausura:
 $G_h = G_{dh} + G_b \times \cos \theta_z$
(también válido para
irradiación horaria)

	DNI irradiancia directa en incidencia normal	DHI irradiancia difusa en un plano horizontal	GHI irradiancia global en un plano horizontal
irradiancia (W/m ²)	G_b	G_{dh}	G_h
irradiación horaria (Wh/m ²)	I_b	I_{dh}	I_h

Definiciones básicas

Componentes de la radiación solar (280-3000nm)

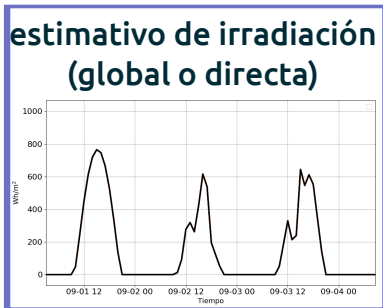


relación de clausura:
 $G_h = G_{dh} + G_b \times \cos \theta_z$
(también válido para
irradiación horaria)

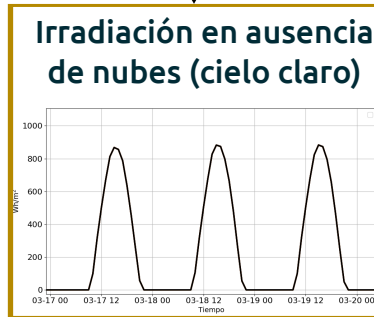
- son producto de la interacción de la radiación solar con la atmósfera
- tienen diferentes características
- modelado de cada componente solar es un problema diferente

	DNI irradiancia directa en incidencia normal	DHI irradiancia difusa en un plano horizontal	GHI irradiancia global en un plano horizontal
irradiancia (W/m ²)	G_b	G_{dh}	G_h
irradiación horaria (Wh/m ²)	I_b	I_{dh}	I_h
tecnologías CSP estimar recurso en plano de orientación arbitraria			variable más relevada

Modelo satelital de tipo semi-empírico



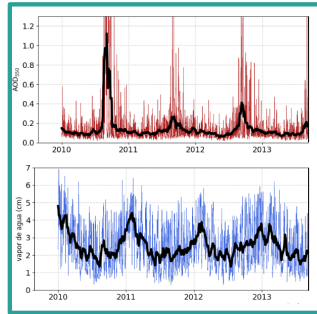
$$\hat{I} = I_{cc} \times F$$



**factor de atenuación
por nubosidad**

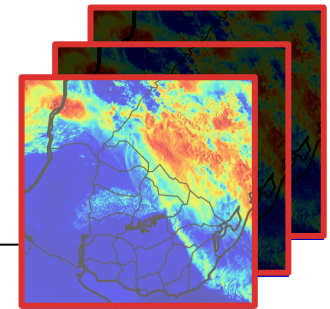
Modelo satelital de tipo semi-empírico

variables
atmosféricas



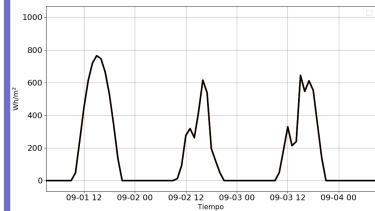
aerosoles, vapor de agua

nubosidad



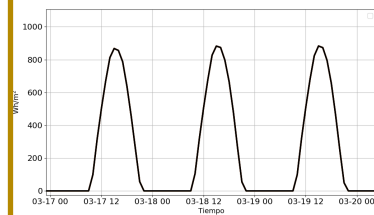
Imágenes, satelitales

estimativo de irradiación
(global o directa)



$$\hat{I} = I_{cc} \times F$$

Irradiación en ausencia
de nubes (cielo claro)



factor de atenuación
por nubosidad

Objetivos

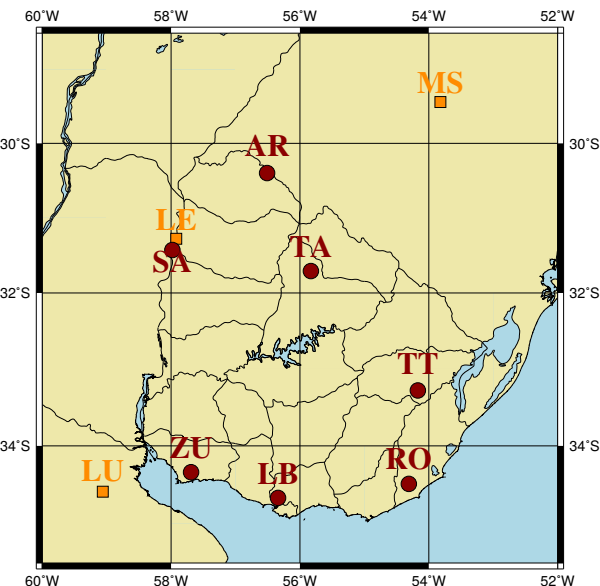
Estimar GHI y DNI en cielo claro

con baja incertidumbre, a escala horaria,
a partir de modelos con base física,
usando información atmosférica disponible

Modelar GHI y DNI en todo cielo

con enfoque híbrido a partir de modelos de cielo claro
e imágenes satelitales.

Medidas de irradiancia utilizadas



Estaciones tipo I:

- miden GHI y DNI
- incertidumbres a nivel horario de 3-5% (GHI) y 2-4% (DNI)
- períodos entre 3 y 7 años de datos
- GHI 16k horas seleccionadas por sitio (~93% QC)
- DNI 8k horas seleccionadas por sitio (~80% QC)

Estaciones tipo II (RMCIS):

- miden GHI
- incertidumbre a nivel horario de 5%
- períodos entre 3 y 8 años de datos
- 17k horas seleccionadas por sitio (~93% QC)



pirheliómetro
(DNI)



piranómetro
(GHI)

Definiciones básicas

Métricas de desempeño

Necesarias para evaluar la concordancia de una serie temporal con una serie de referencia

$$Y = (y_1, \dots, y_N)$$

$$\hat{Y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_N)$$

desvío medio

$$\text{MBD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i - y_i$$

$$\text{rMBD} = \frac{\text{MBD}}{\langle Y \rangle} \times 100$$

desvío absoluto medio

$$\text{MAD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|$$

$$\text{rMAD} = \frac{\text{MAD}}{\langle Y \rangle} \times 100$$

desvío cuadrático medio

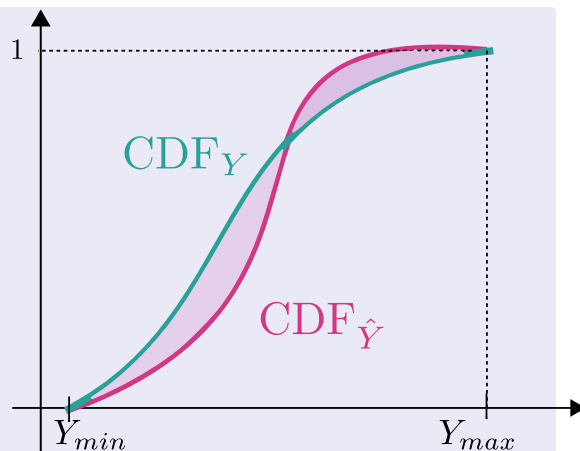
$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

$$\text{rRMSD} = \frac{\text{RMSD}}{\langle Y \rangle} \times 100$$

Integral de Kolmogorov-Smirnov

$$\text{KSI} = \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} |CDF_{\hat{Y}}(y) - CDF_Y(y)| dy$$

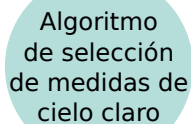
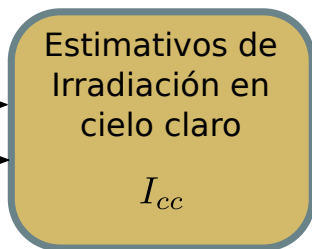
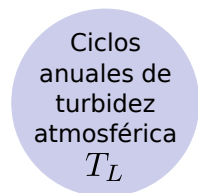
cuantifica la similitud entre las distribuciones de probabilidad



Parte I

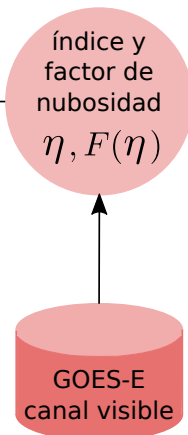
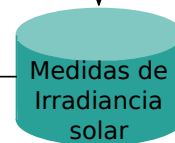
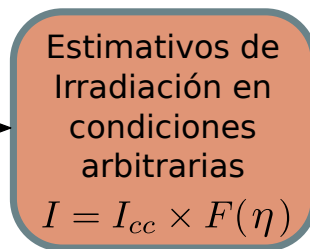
Información
atmosférica

cielo claro



Parte II

nubosidad arbitraria



Principales objetivos de la tesis

Productos desarrollados en la tesis

Bases de datos utilizadas

Principales validaciones realizadas

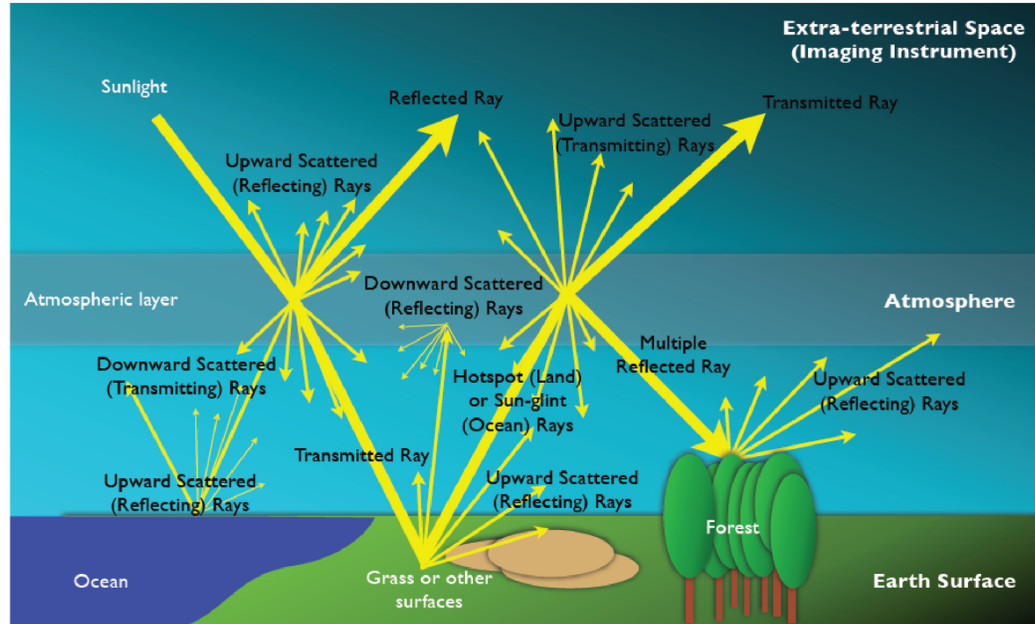


Parte I:

Modelos de cielo claro

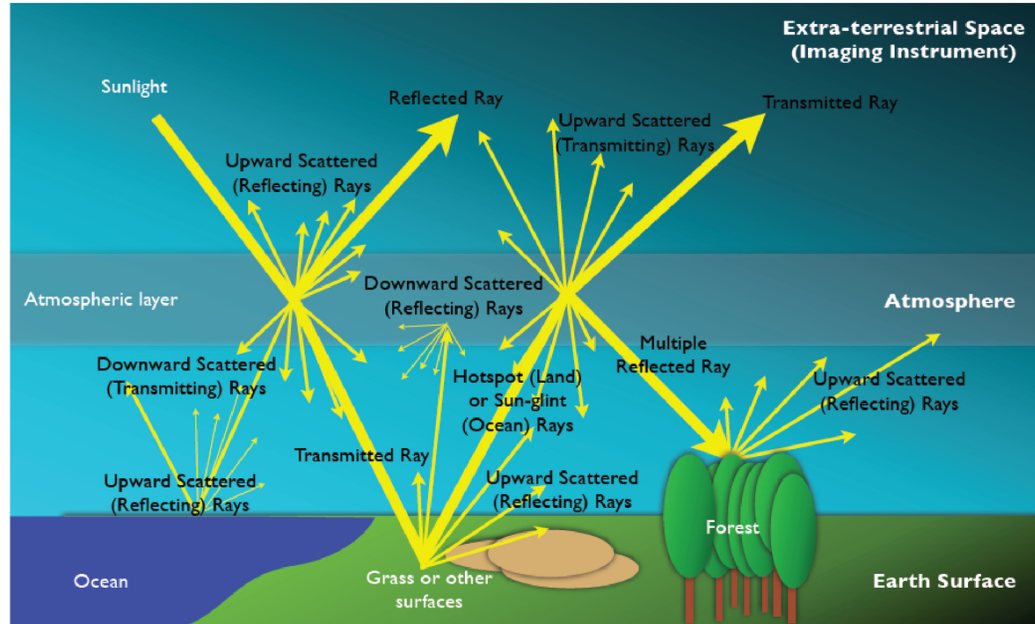
Modelado de irradiancia en cielo claro

procesos relevantes



Modelado de irradiancia en cielo claro

procesos relevantes



variabilidad impacto

-dispersión molecular

-

+

-dispersión por aerosoles

++

++

-absorción por aerosoles

++

-

-absorción por vapor de agua

++

+

-absorción por ozono

+

-

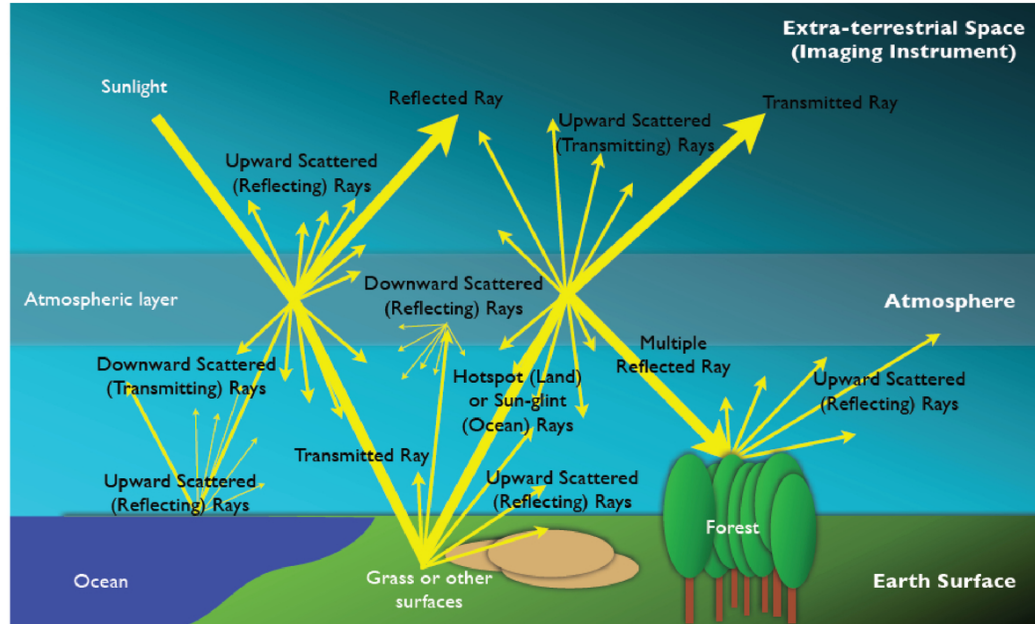
-abs. por otros gases

-

-

Modelado de irradiancia en cielo claro

procesos relevantes



variabilidad impacto

-dispersión molecular

-

+

-dispersión por aerosoles

++

++

-absorción por aerosoles

++

-

-absorción por vapor de agua

++

+

-absorción por ozono

+

-

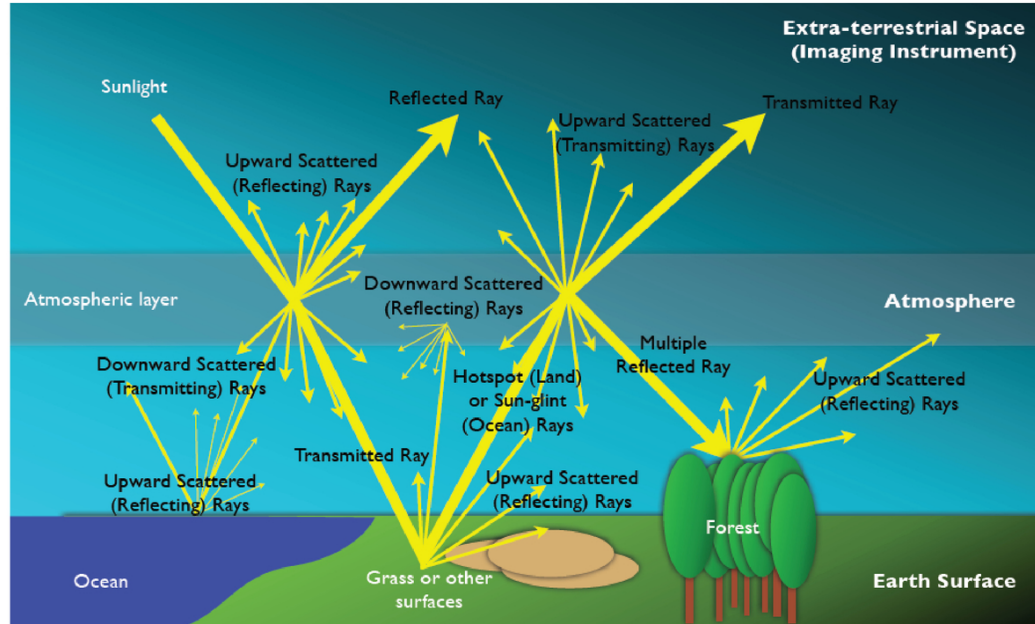
-abs. por otros gases

-

-

Modelado de irradiancia en cielo claro

procesos relevantes



Nomenclatura:

dispersión
+ absorción

atenuación/extinción

Atmósfera de Rayleigh =
atmósfera sin aerosoles ni H₂O
(teórica)

-dispersión molecular

-dispersión por aerosoles

-absorción por aerosoles

-absorción por vapor de agua

-absorción por ozono

-abs. por otros gases

variabilidad impacto

-	+
++	++
++	-
++	+
+	-
-	-

Modelado de irradiancia en cielo claro

Modelos de cielo claro de banda ancha:

- utilizan entre 0 y 8 variables atm. de entrada para modelar estos procesos
- capacidad para captar las variaciones de aerosoles y vapor de agua

Modelado de irradiancia en cielo claro

Modelos de cielo claro de banda ancha:

- utilizan entre 0 y 8 variables atm. de entrada para modelar estos procesos
- capacidad para captar las variaciones de **aerosoles** y **vapor de agua**

Variables utilizadas

Turbidez de Linke (T_L)

- parámetro global adimensionado
- incluye efectos de aerosoles y H_2O
- se interpreta como el nro. de atm. de Rayleigh equivalentes
- valores típicamente entre 2 y 7

Modelado de irradiancia en cielo claro

Modelos de cielo claro de banda ancha:

- utilizan entre 0 y 8 variables atm. de entrada para modelar estos procesos
- capacidad para captar las variaciones de **aerosoles** y **vapor de agua**

Variables utilizadas

Turbidez de Linke (T_L)

- parámetro global adimensionado
- incluye efectos de aerosoles y H_2O
- se interpreta como el nro. de atm. de Rayleigh equivalentes
- valores típicamente entre 2 y 7

Profundidad óptica de aerosoles (AOD)

$$T_\lambda = \exp(-m \text{AOD}_\lambda)$$

$T \rightarrow$ transmitancia espectral
 $m \rightarrow$ masa de aire

Parámetros de Angström (β , α)

$$\text{AOD}_\lambda = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (\text{Ley de Angström})$$

turbidez (AOD_{1000}) de Ang., **exponente de Ang.**

contenido de vapor de agua precipitable (w)

se cuantifica con la altura de la columna de agua sobre el nivel del mar a P y T estándar (en cm)

Modelos de cielo claro

Se utilizaron 5 modelos de diferente complejidad destacados en diferentes estudios

modelos estudiados	cita principal	descripción básica	variables requeridas
ESRA	Rigollier et al.(2000) ¹	estima transmitancia global para DNI y parametriza DHI con T_L	T_L
KIP	Ineichen y Perez (2002) ²	propone expresiones empíricas para GHI y DNI en func. de T_L	T_L
SOLs	Ineichen (2008) ³	parametrización simple del modelo de transferencia (RTM) radiante SOLIS	AOD_{700} , w
REST2	Gueymard (2008) ⁴	Producto de trasnmitancias en dos bandas espectrales	β , a_1 , a_2 , w , ρ_{g1} , ρ_{g2} , $[O_3]$, u_n
McClear	Lefevre et al. (2013) ⁵	Tablas de ábacos a partir del RTM Libradtran.	AOD_{550} , a , w , $[O_3]$

¹Sol. En. 2000. Vol. 77, P: 159

²Sol. En. 2002. Vol. 73, P: 151

³Sol. En. 2008. Vol. 82, P: 758

⁴Sol. En. 2008. Vol. 82, P: 272

⁵Atm. Meas. Tech. Vol. 6, P: 2403

Modelos de cielo claro

Se utilizaron 5 modelos de diferente complejidad destacados en diferentes estudios

modelos estudiados	cita principal	descripción básica	variables requeridas
ESRA	Rigollier et al.(2000) ¹	estima transmitancia global para DNI y parametriza DHI con T_L	T_L
KIP	Ineichen y Perez (2002) ²	propone expresiones empíricas para GHI y DNI en func. de T_L	T_L
SOLs	Ineichen (2008) ³	parametrización simple del modelo de transferencia (RTM) radiante SOLIS	AOD_{700} , w
REST2	Gueymard (2008) ⁴	Producto de trasnmitancias en dos bandas espectrales	β , a_1 , a_2 , w , ρ_{g1} , ρ_{g2} , $[O_3]$, u_n
McClear	Lefevre et al. (2013) ⁵	Tablas de ábacos a partir del RTM Libradtran.	AOD_{550} , a , w , $[O_3]$

su desempeño debe evaluarse localmente y depende de:

-clima y geografía locales

-disponiblidad de información atmosférica de calidad

¹Sol. En. 2000. Vol. 77, P: 159

²Sol. En. 2002. Vol. 73, P: 151

³Sol. En. 2008. Vol. 82, P: 758

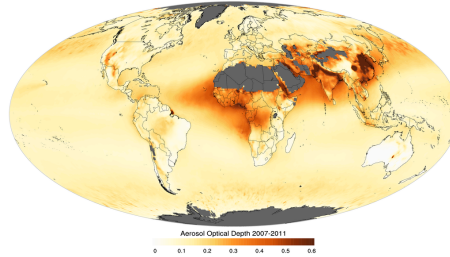
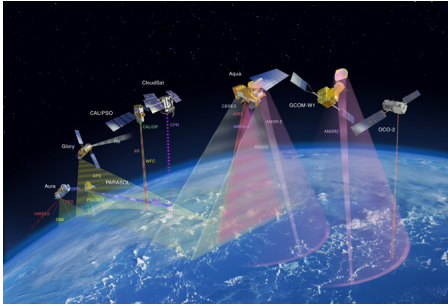
⁴Sol. En. 2008. Vol. 82, P: 272

⁵Atm. Meas. Tech. Vol. 6, P: 2403

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

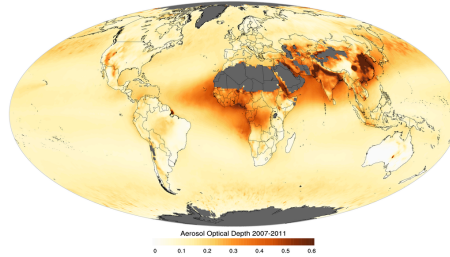
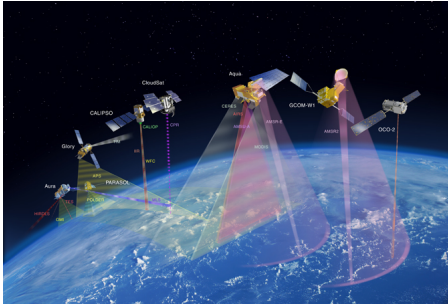
Estimativos de satélites atmosféricos



MODIS (Aqua y Terra)
satelites de órbita baja (700km)
~14 vueltas a la tierra/día
gran resolución espacial

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Estimativos de satélites atmosféricos



MODIS (Aqua y Terra)
satélites de órbita baja (700km)
~14 vueltas a la tierra/día
gran resolución espacial

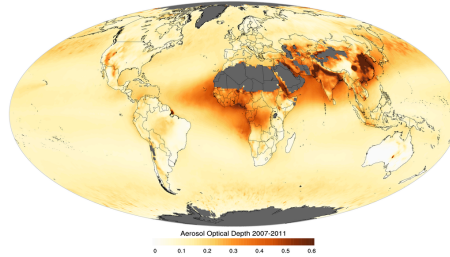
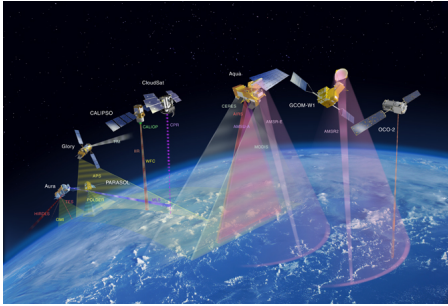
Bases de reanálisis

- aproximación sistemática que asimila observaciones a modelos numéricos de atmósfera
- información físicamente consistente, sin huecos y de alta resolución temporal

Ejemplos: MERRA-2, CAMS-ECMWF

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Estimativos de satélites atmosféricos



MODIS (Aqua y Terra)
satélites de órbita baja (700km)
~14 vueltas a la tierra/día
gran resolución espacial

Bases de reanálisis

- aproximación sistemática que asimila observaciones a modelos numéricos de atmósfera
- información físicamente consistente, sin huecos y de alta resolución temporal

Ejemplos: MERRA-2, CAMS-ECMWF

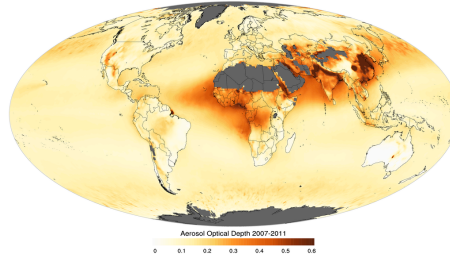
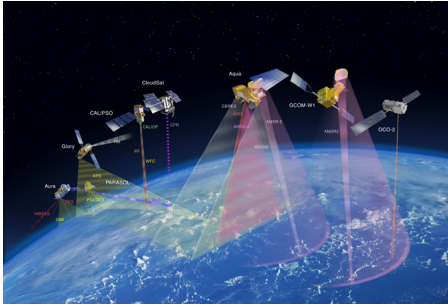
Mediciones en superficie



red AERONET
>600 sitios en el mundo
radiómetros espectrales con seguidor
miden radiancia en al menos 6 bandas
(VIS-NIR)
algoritmo de inversión para props. de
aerosoles y w

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Estimativos de satélites atmosféricos



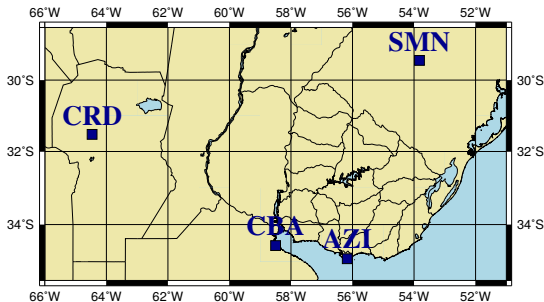
MODIS (Aqua y Terra)
satélites de órbita baja (700km)
~14 vueltas a la tierra/día
gran resolución espacial

Bases de reanálisis

- aproximación sistemática que asimila observaciones a modelos numéricos de atmósfera
- información físicamente consistente, sin huecos y de alta resolución temporal

Ejemplos: **MERRA-2**, CAMS-ECMWF

Mediciones en superficie



red AERONET

>600 sitios en el mundo

radiómetros espectrales con seguidor
miden radiancia en al menos 6 bandas
(VIS-NIR)

algoritmo de inversión para props. de
aerosoles y w

Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Comparación de bases MERRA-2 y MODIS con Aeronet

	MIX-MODIS (diario)			MERRA-2 (horario)		
	AOD ₅₅₀	α	w	AOD ₅₅₀	α	w
r $\tilde$ MBD(%)	+8.2	+18.0	+14.9	+17.6	-2.9	+7.1
rR $\tilde$ MSD(%)	39.9	20.4	20.9	33.4	26.8	11.2
Correlación	0.684	0.085	0.829	0.716	0.361	0.946

-estimativos MERRA-2 (horarios) son más precisos que MODIS (diario)
-ambas bases tienen gran cobertura pero MERRA-2 provee series más completas

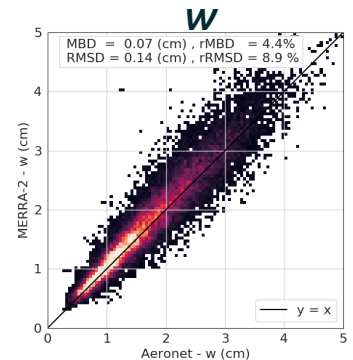
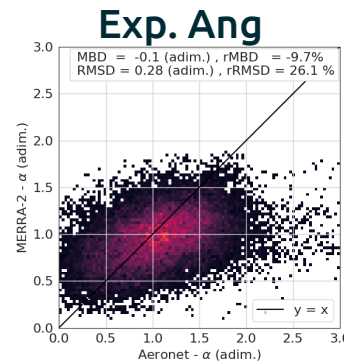
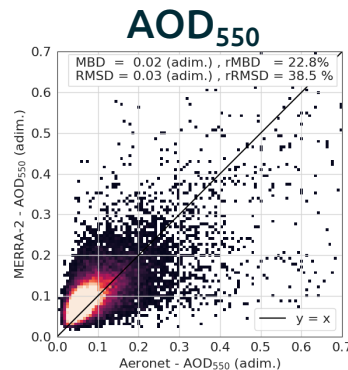
Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Comparación de bases MERRA-2 y MODIS con Aeronet

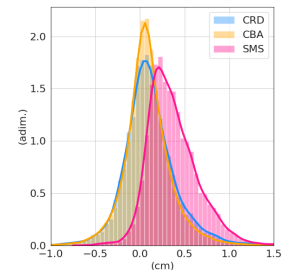
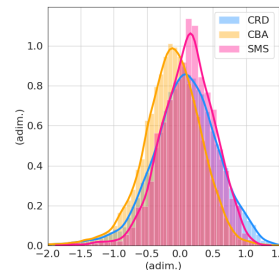
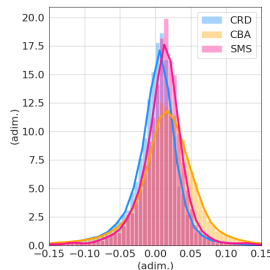
	MIX-MODIS (diario)			MERRA-2 (horario)		
	AOD ₅₅₀	α	w	AOD ₅₅₀	α	w
r $\tilde$ MBD(%)	+8.2	+18.0	+14.9	+17.6	-2.9	+7.1
rRMSD(%)	39.9	20.4	20.9	33.4	26.8	11.2
Correlación	0.684	0.085	0.829	0.716	0.361	0.946

-estimativos MERRA-2 (horarios) son más precisos que MODIS (diario)
-ambas bases tienen gran cobertura pero MERRA-2 provee series más completas

MERRA-2



comportamiento
variable no permite
postprocesamiento



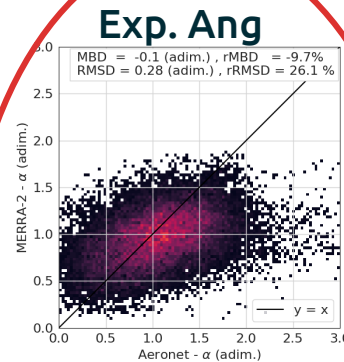
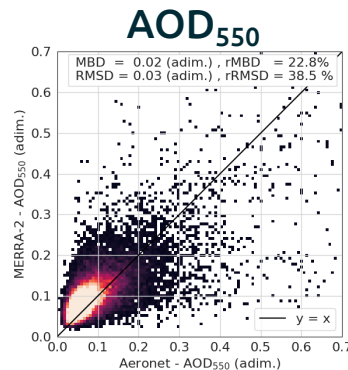
Información atmosférica - aerosoles y H₂O

Comparación de bases MERRA-2 y MODIS con Aeronet

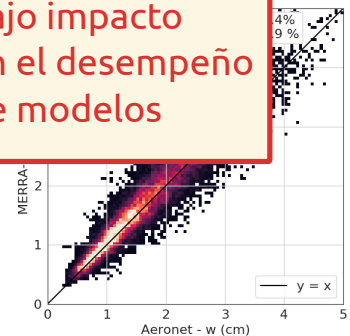
	MIX-MODIS (diario)			MERRA-2 (horario)		
	AOD ₅₅₀	α	w	AOD ₅₅₀	α	w
rMBD(%)	+8.2	+18.0	+14.9	+17.6	-2.9	+7.1
rRMSD(%)	39.9	20.4	20.9	33.4	26.8	11.2
Correlación	0.684	0.085	0.829	0.716	0.361	0.946

-estimativos MERRA-2 (horarios) son más precisos que MODIS (diario)
-ambas bases tienen gran cobertura pero MERRA-2 provee series más completas

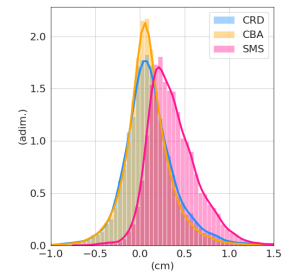
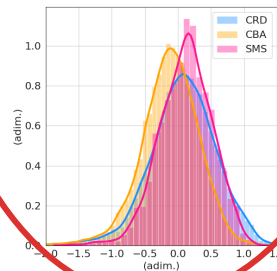
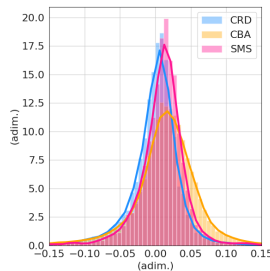
MERRA-2



bajo impacto en el desempeño de modelos



comportamiento variable no permite postprocesamiento



Información atmosférica - Turbidez de Linke

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L : $T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$
transmitancia directa

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L :

$$T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

transmitancia directa

atm. Rayleigh

ppalmente. aerosoles y H_2O

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L :

$$T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

transmitancia directa

atm. Rayleigh

ppalmente. aerosoles y H_2O

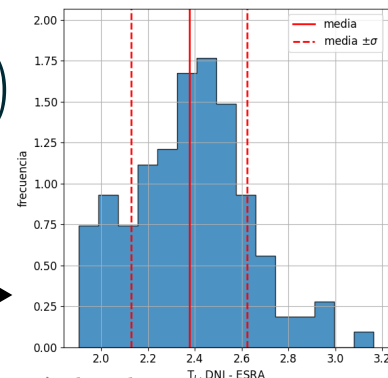
Métodos usados para la determinación de ciclos T_L

Método I

a partir de
medidas de
DNI de Cielo
Claro (CC)

$$T_L = \frac{1}{m \delta_R(m)} \ln \left(\frac{I_{sc} F_n}{I_b} \right)$$

serie horaria de T_L



(abril, LE $\rightarrow T_L = 2.4$)

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L :

$$T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

transmitancia directa

atm. Rayleigh

ppalmente. aerosoles y H_2O

Métodos usados para la determinación de ciclos T_L

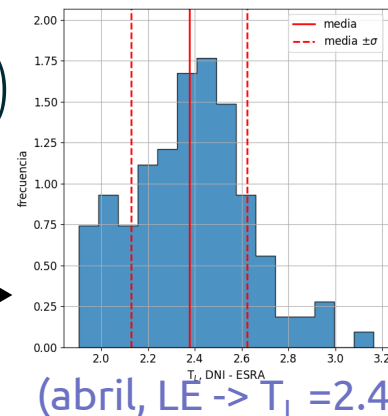
Método I

a partir de
medidas de
DNI de Cielo
Claro (CC)

$$T_L = \frac{1}{m \delta_R(m)} \ln \left(\frac{I_{sc} F_n}{I_b} \right)$$

serie horaria de T_L

- método directo y analítico
- escasez de medidas de DNI



Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L :

$$T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

transmitancia directa

atm. Rayleigh

ppalmente. aerosoles y H_2O

Métodos usados para la determinación de ciclos T_L

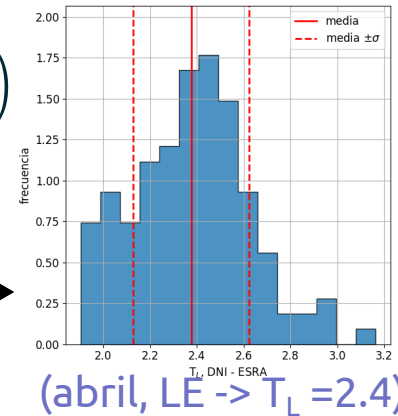
Método I

a partir de
medidas de
DNI de Cielo
Claro (CC)

$$T_L = \frac{1}{m \delta_R(m)} \ln \left(\frac{I_{sc} F_n}{I_b} \right)$$

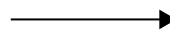
serie horaria de T_L

- método directo y analítico
- escasez de medidas de DNI



Método II

a partir de
medidas de
GHI (en CC)



- modelo de CC como referencia (ESRA)
- T_L como variable independiente
- minimizar error de estimativos de GHI

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Definición
de T_L :

$$T_b = \frac{I_b}{I_{sc} F_n} = \exp(-\delta(m) m) = \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

transmitancia directa

atm. Rayleigh

ppalmente. aerosoles y H_2O

Métodos usados para la determinación de ciclos T_L

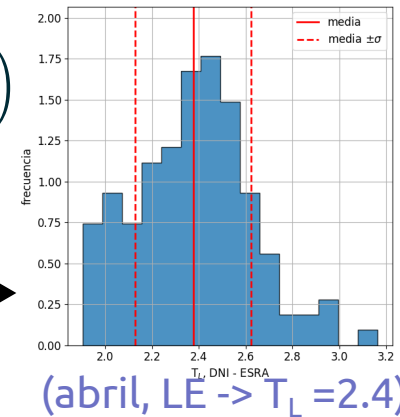
Método I

a partir de
medidas de
DNI de Cielo
Claro (CC)

$$T_L = \frac{1}{m \delta_R(m)} \ln \left(\frac{I_{sc} F_n}{I_b} \right)$$

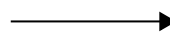
serie horaria de T_L

- método directo y analítico
- escasez de medidas de DNI



Método II

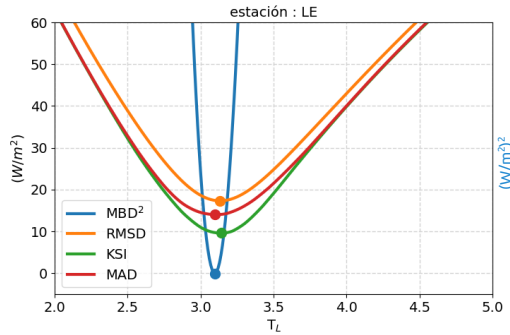
a partir de
medidas de
GHI (en CC)



- modelo de CC como referencia (ESRA)
- T_L como variable independiente
- minimizar error de estimativos de GHI
- gran cobertura espacial de estaciones que miden GHI
- es la estrategia elegida

Información atmosférica - Turbidez de Linke

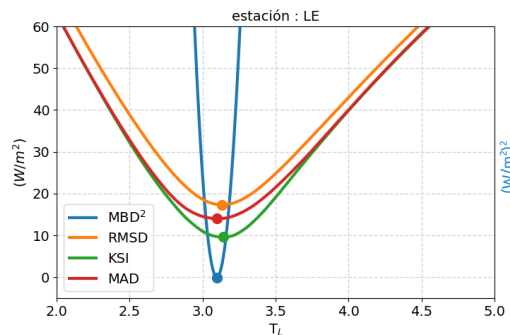
Método II



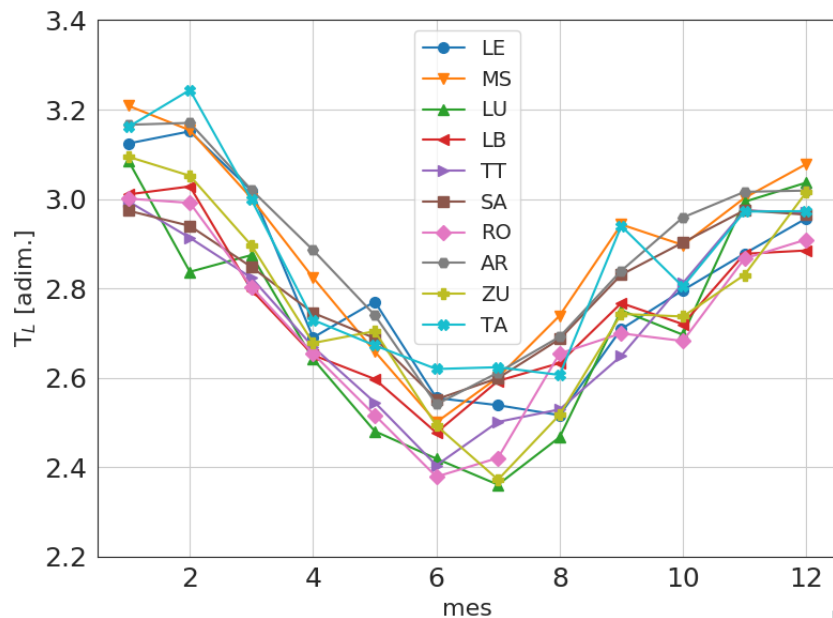
métricas de desempeño
son minimizadas en cada
mes en cada sitio

Información atmosférica - Turbidez de Linke

Método II



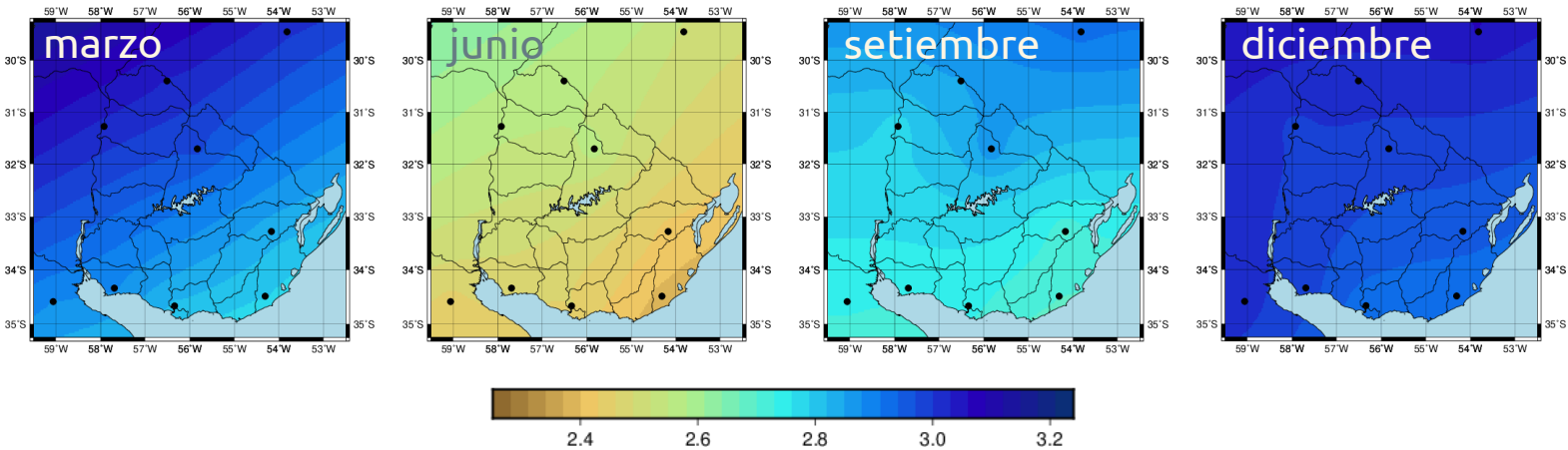
métricas de desempeño
son minimizadas en cada
mes en cada sitio



-comportamiento temporal
bien marcado
-mínimos en invierno,
máximos en verano

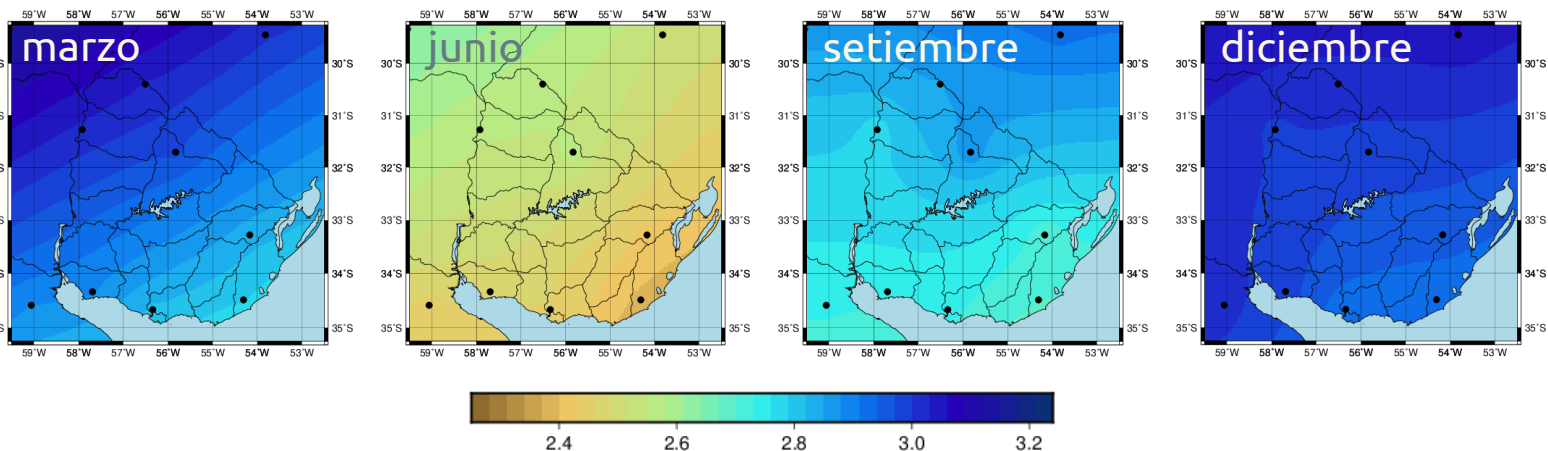
Información atmosférica - Turbidez de Linke

Distribución espacial de ciclos de T_L



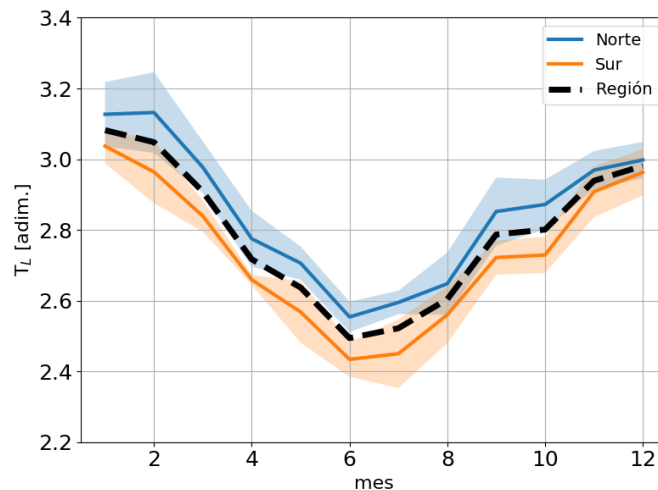
Información atmosférica - Turbidez de Linke

Distribución espacial de ciclos de T_L



aplicando técnicas de agrupamiento (*k-means*) se distinguen dos regiones marcadas: Sur y Norte

Región	Sitios
Sur	LU, LB, TT, RO, ZU
Norte	LE, MS, SA, AR, TA



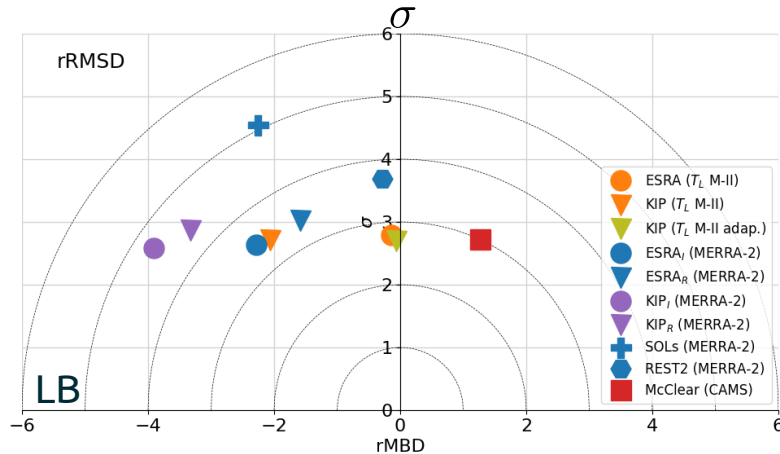
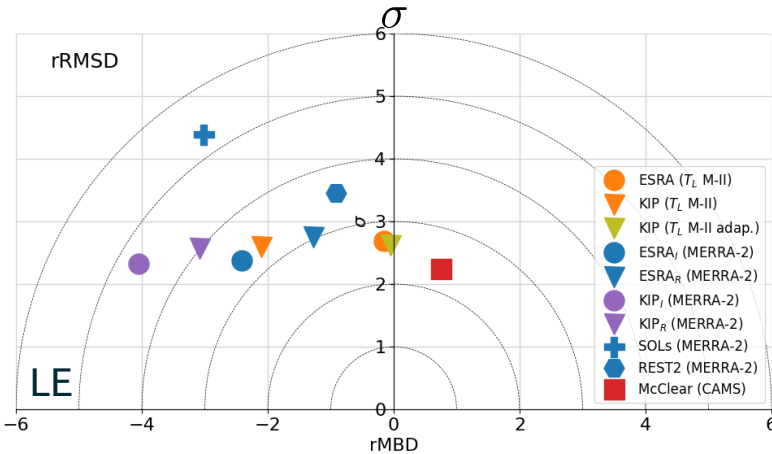
Modelos de cielo claro - Validación GHI

Modelos de cielo claro - Validación GHI

Validación

$$\text{RMSD}^2 = \text{MBD}^2 + \sigma^2$$

desviación estándar de los residuos

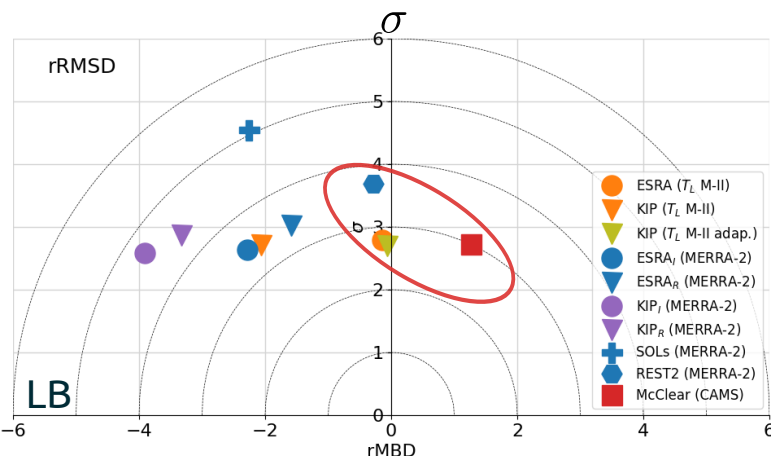
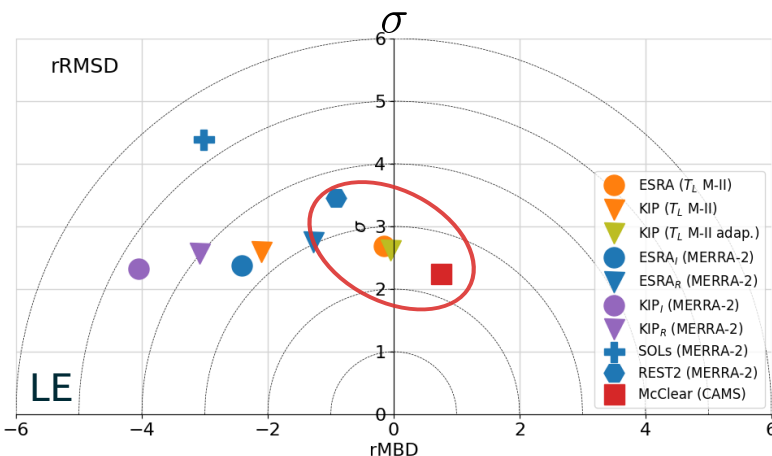


Modelos de cielo claro - Validación GHI

Validación

$$\text{RMSD}^2 = \text{MBD}^2 + \sigma^2$$

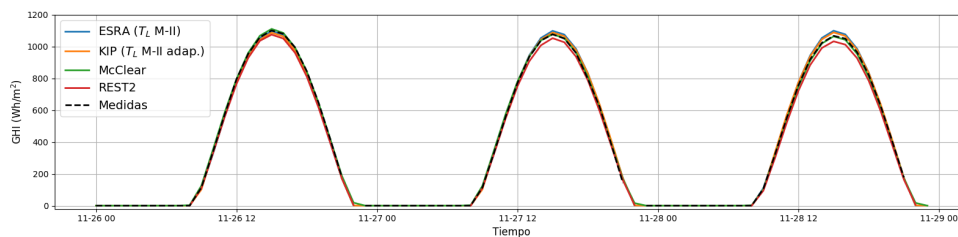
desviación estándar de los residuos



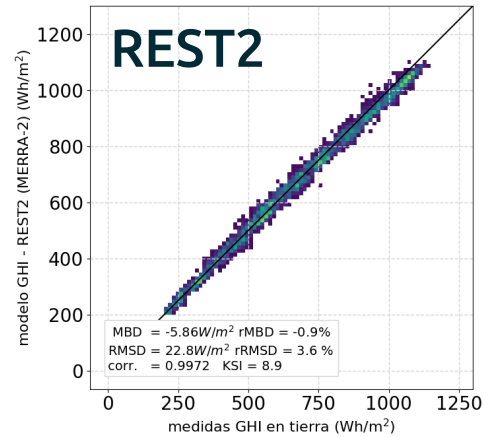
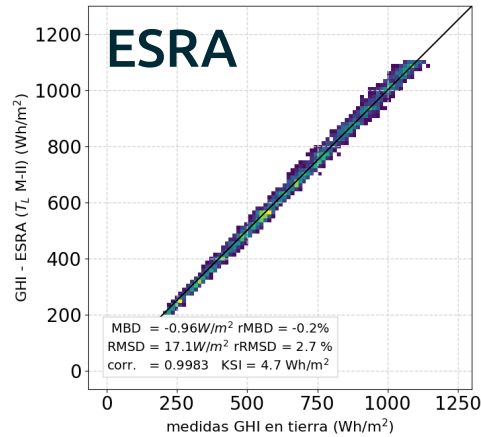
se logran $|\text{rMBD}| < 1\%$ y $\text{rRMSD} < 4\%$, destacándose:

-ESRA y KIP basados en T_L (local o regional)

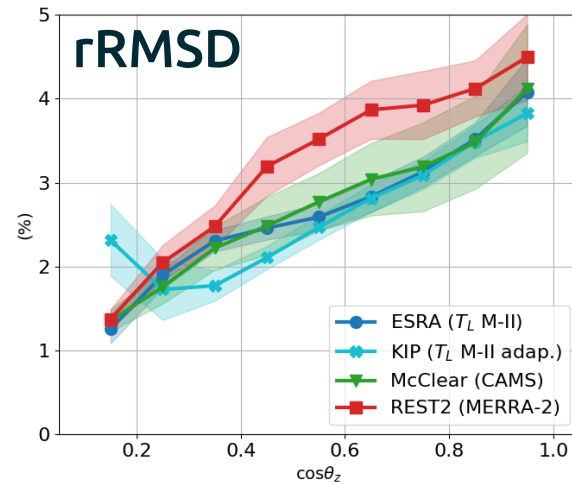
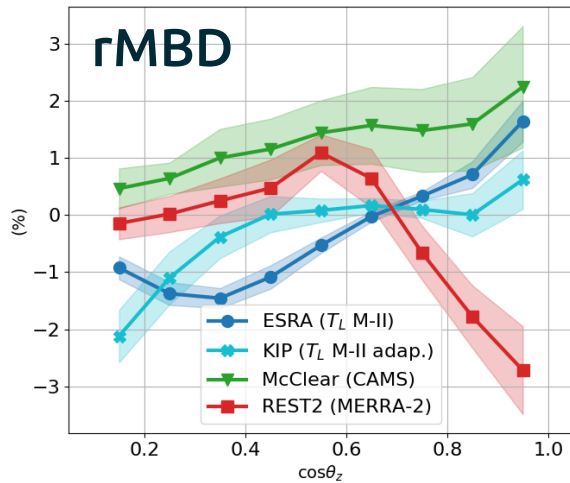
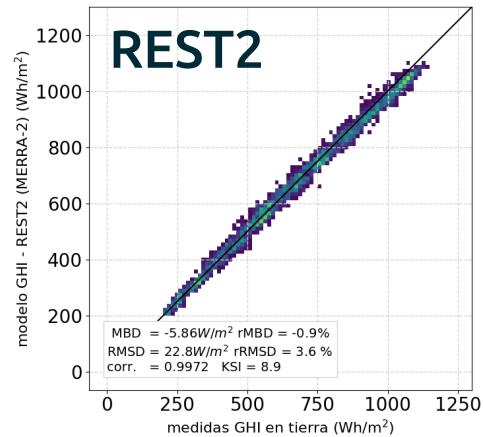
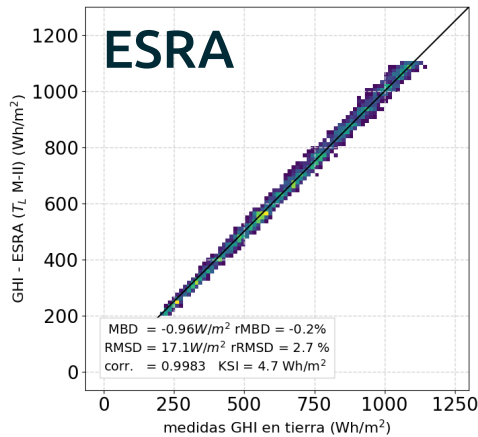
-McCclear (basado en CAMS) y REST2 (MERRA-2)



Modelos de cielo claro - Validación GHI



Modelos de cielo claro - Validación GHI

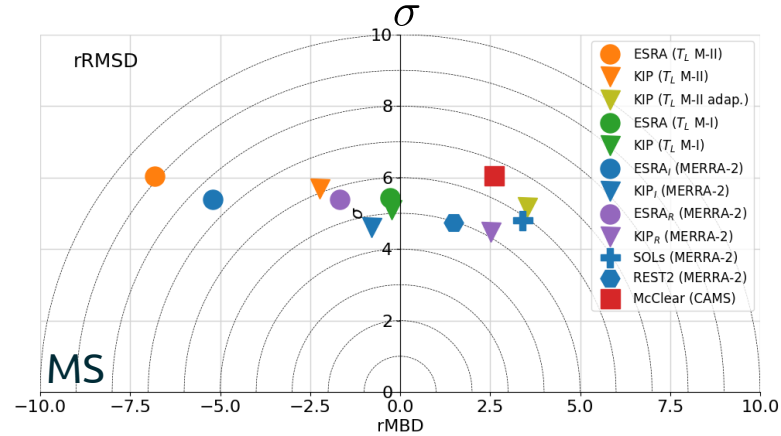
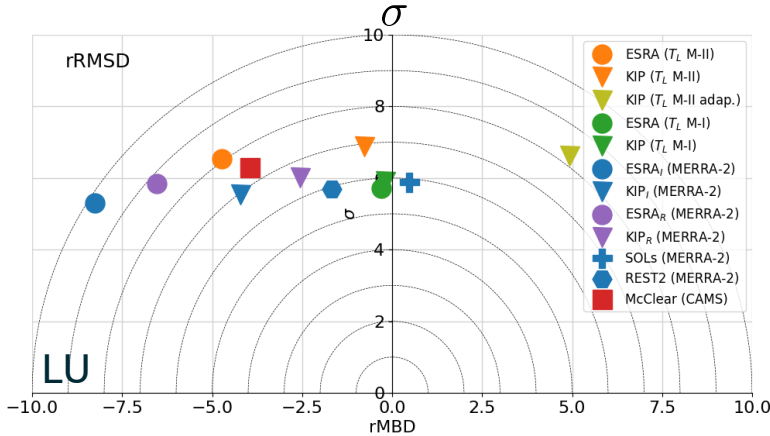


$\cos\theta_z$ alto $\rightarrow$ mayor altura solar (mediodía solar)

Modelos de cielo claro - Validación DNI

$$\text{RMSD}^2 = \text{MBD}^2 + \sigma^2$$

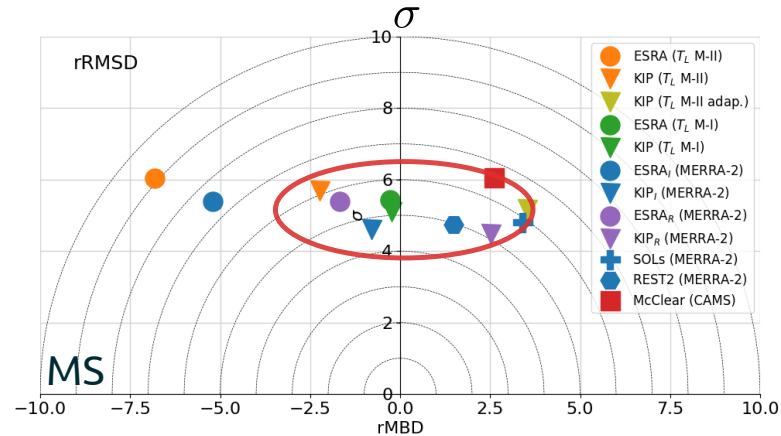
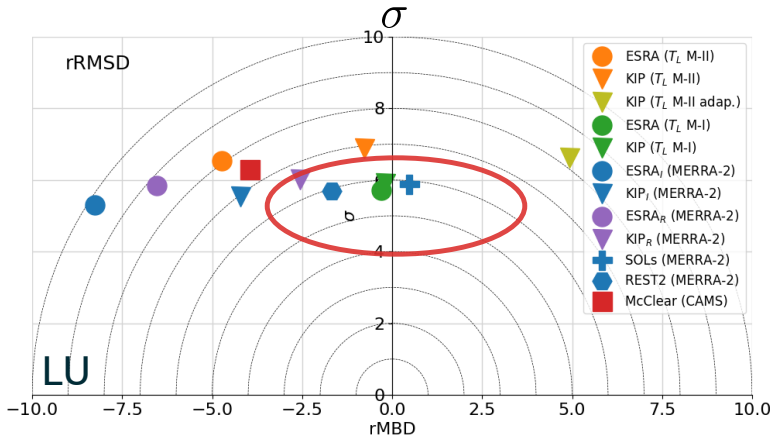
desviación estándar de los residuos



Modelos de cielo claro - Validación DNI

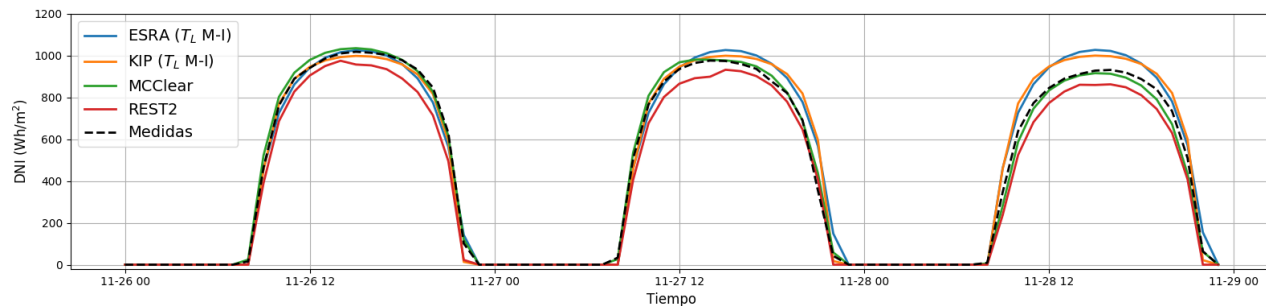
$$\text{RMSD}^2 = \text{MBD}^2 + \sigma^2$$

desviación estándar de los residuos

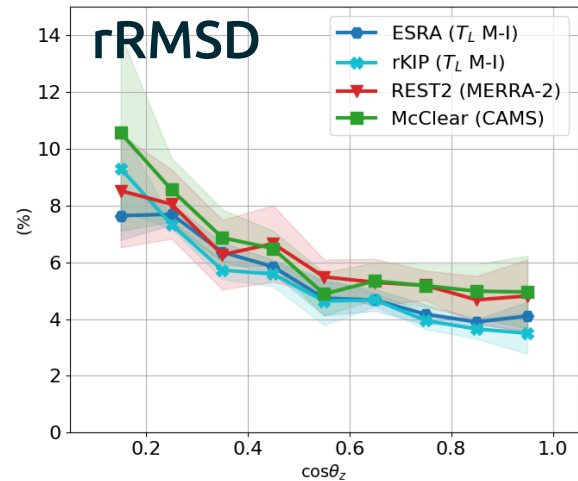
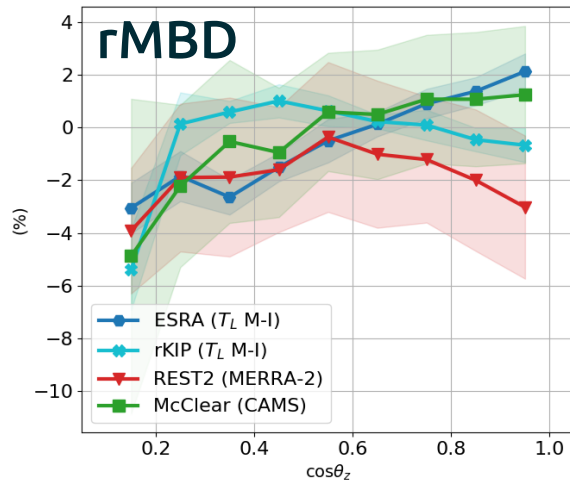
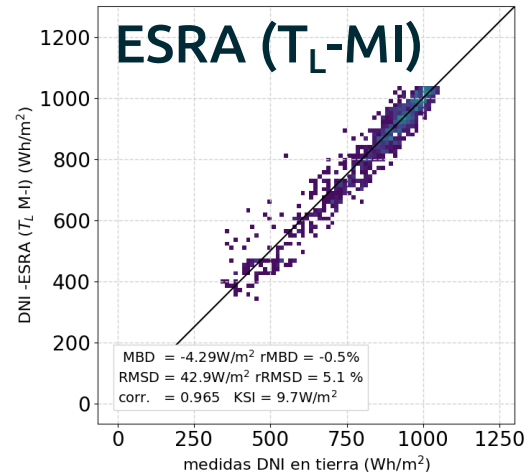
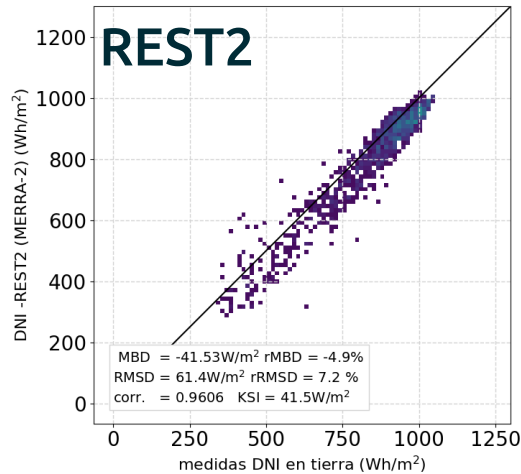


pocos alcanzan $|\text{rMBD}| < 3\%$ y $\text{rRMSD} < 6.5\%$ en las tres estaciones:

- modelos basados en T_L -M I son precisos pero no extrapolables
- REST-2 (MERRA-2) y McClear (CAMS) en promedio tienen la mejor precisión (captan variabilidad de la atmósfera)



Modelos de cielo claro - Validación DNI



Modelado en cielo claro - Conclusiones



Modelado en cielo claro - Conclusiones

Irradiación global:

se alcanzan rendimientos de $r\text{RMSD} < 4\%$, $|r\text{MBD}| < 1\%$

modelos simples basados en ciclos anuales de T_L alcanzan incertidumbre similar a los instrumentos de medida para GHI: 3-4% (ESRA, KIP)

Ciclos regionales de turbidez (Sur/Norte) son adecuados

Modelado en cielo claro - Conclusiones

Irradiación global:

se alcanzan rendimientos de $rRMSD < 4\%$, $|rMBD| < 1\%$

modelos simples basados en ciclos anuales de T_L alcanzan incertidumbre similar a los instrumentos de medida para GHI: 3-4% (ESRA, KIP)

Ciclos regionales de turbidez (Sur/Norte) son adecuados

Irradiación directa:

se alcanzan rendimientos de $rRMSD < 7\%$, $|rMBD| < 3\%$

modelos basados en ciclos medios no son adecuados.

(excepto con T_L del método I, específico de estaciones con medida de DNI)

es conveniente usar información atmosférica intradiaria,
como REST2 (con MERRA-2) y McClear (CAMS)



Parte II: **Modelos para toda condición de cielo**

Parte I

Información atmosférica

cielo claro



Estimativos de Irradiación en cielo claro

I_{cc}

Algoritmo de selección de medidas de cielo claro

Parte II

nubosidad arbitraria

Estimativos de Irradiación en condiciones arbitrarias

$I = I_{cc} \times F(\eta)$

Medidas de Irradiancia solar

índice y factor de nubosidad $\eta, F(\eta)$

GOES-E canal visible

Principales objetivos de la tesis

Productos desarrollados en la tesis

Bases de datos utilizadas

Principales validaciones realizadas

$$\hat{I} = I_{cc} \times F(\eta)$$

Estructura modelo CIM

estimativo en cielo claro

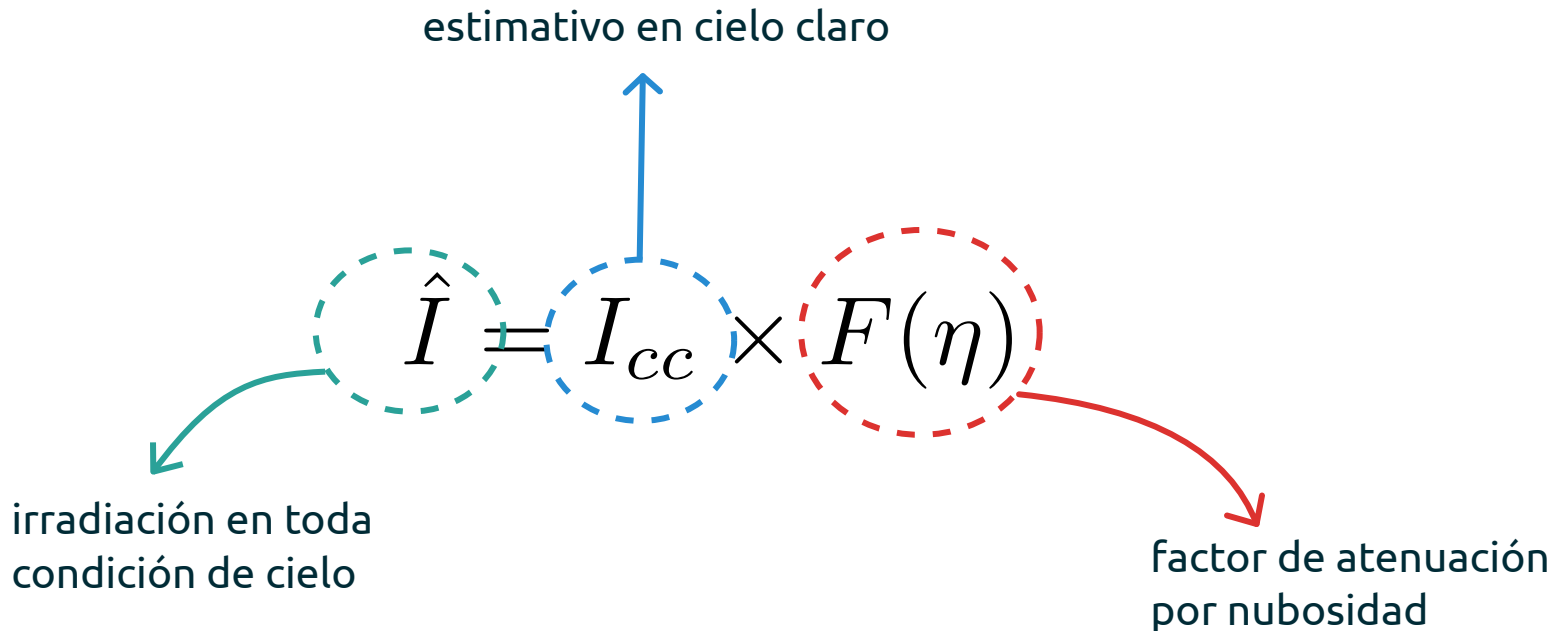
$$\hat{I} = I_{cc} \times F(\eta)$$

The diagram illustrates the CIM model structure with the equation $\hat{I} = I_{cc} \times F(\eta)$. Each term is enclosed in a dashed circle: $\hat{I}$ in a green circle, I_{cc} in a blue circle, and $F(\eta)$ in a red circle. A blue arrow points from the I_{cc} circle to the text 'estimativo en cielo claro' above it. A green arrow points from the $\hat{I}$ circle to the text 'irradiación en toda condición de cielo' below and to the left. A red arrow points from the $F(\eta)$ circle to the text 'factor de atenuación por nubosidad' below and to the right.

irradiación en toda
condición de cielo

factor de atenuación
por nubosidad

Estructura modelo CIM



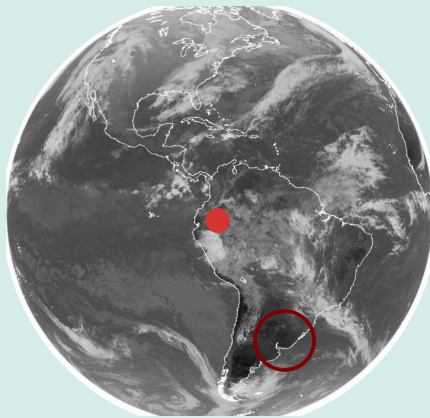
η

es un índice de nubosidad adimensionado obtenido a partir de información del canal visible de GOES-East

Información satelital

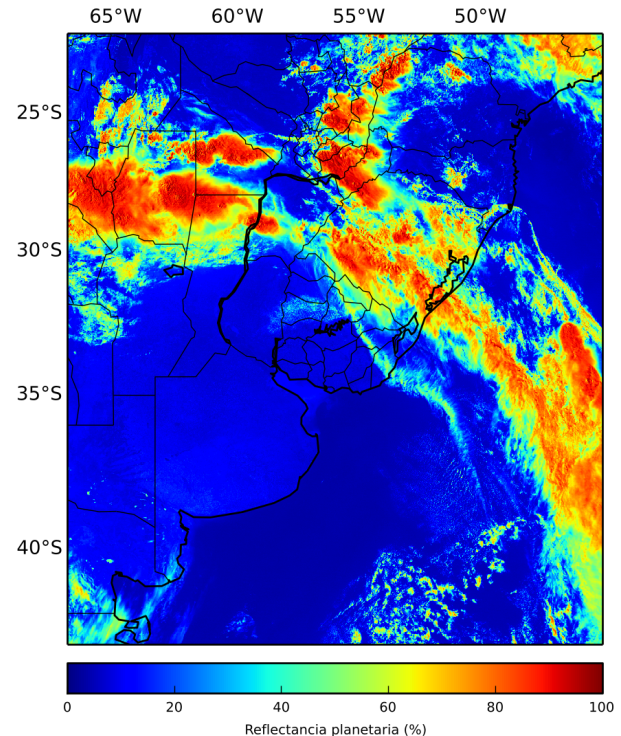
Satélite GOES-East

- longitud 75°W, ~36000 km snm
- GOES-13 (período 04/2010 - 12/2017)
- canal visible: mide la reflectancia planetaria entre 540 y 710 nm
- resolución de 4'x4' (1 km x 1 km) en el nadir (~2 km x 2 km en la región)
- frecuencia de dos imágenes por hora



ángulo de vista ~40°

reflectancia planetaria (ρ)



LES

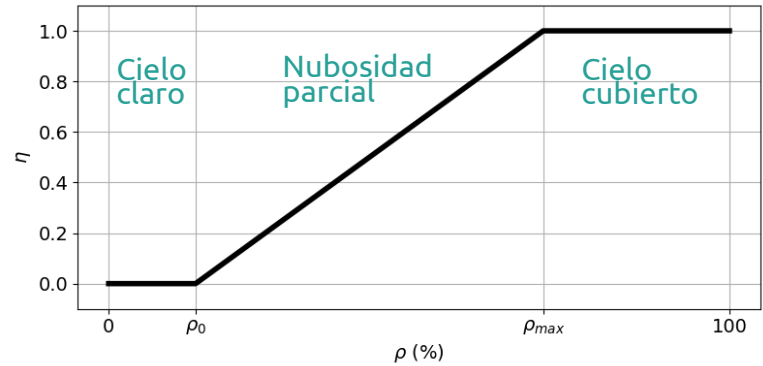
CH1 RP 06-01-2018 12:38 UTC

ρ es el albedo del sistema
Tierra + atm. (adim.)

Información satelital

Índice de nubosidad

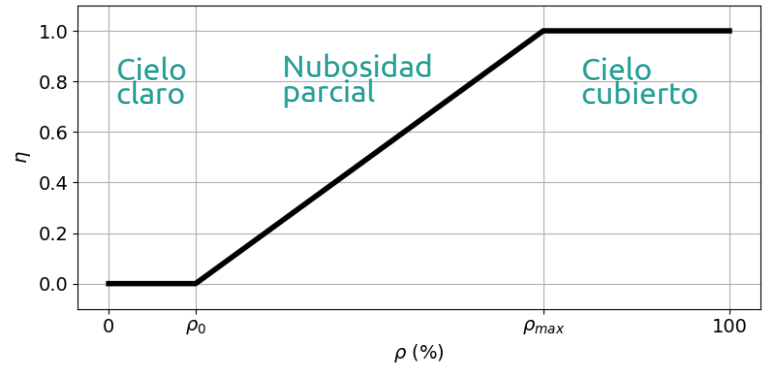
$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$



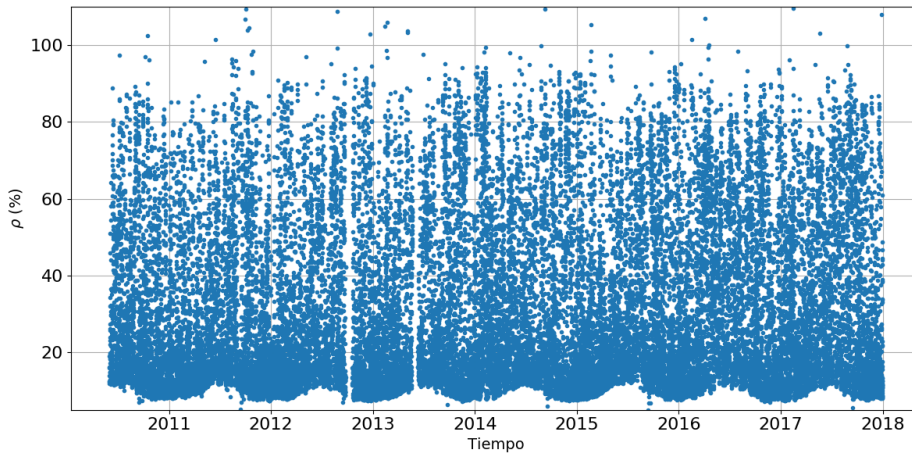
Información satelital

Índice de nubosidad

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$



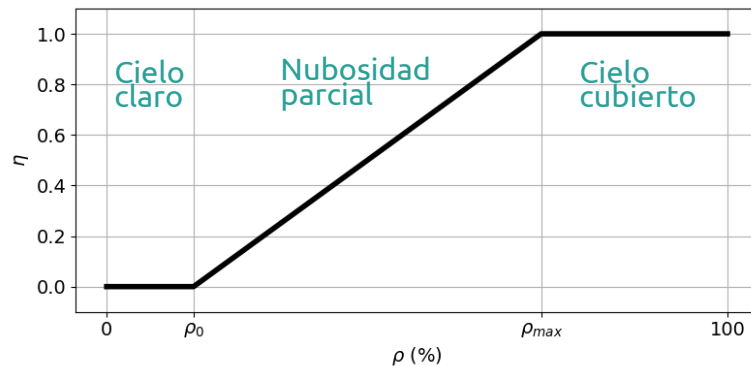
Rango dinámico



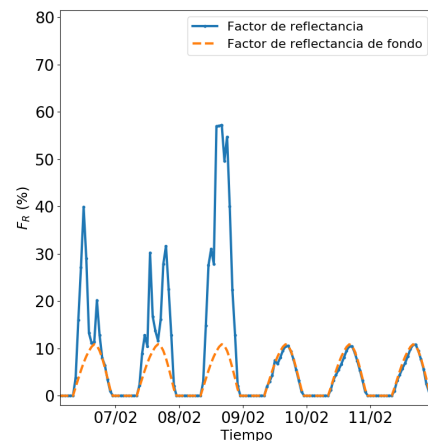
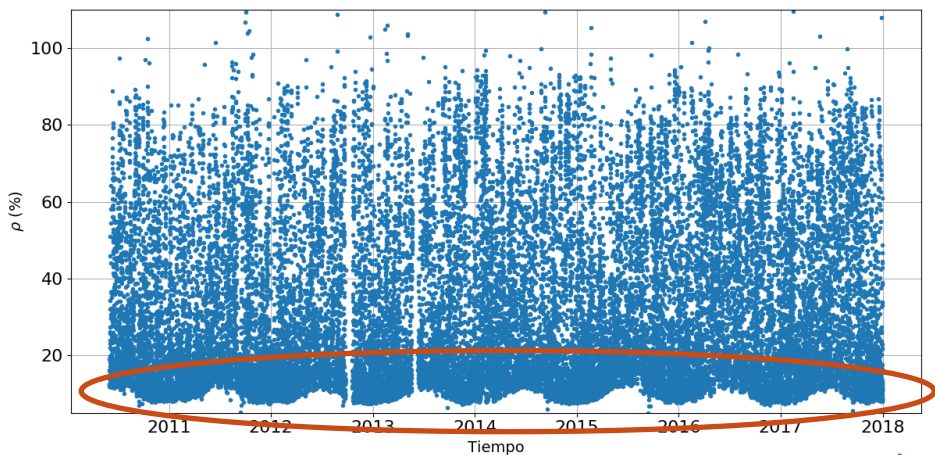
Información satelital

Índice de nubosidad

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$



Rango dinámico

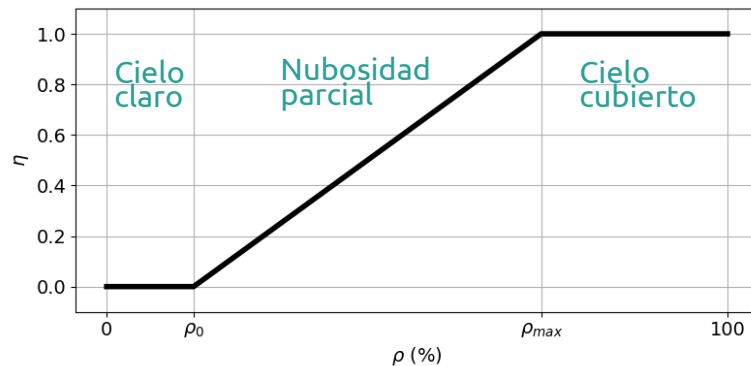


ρ_o Asociado a cielo despejado. Presenta un ciclo marcado, parametrizado como func. de $\cos \theta_z$ y de γ_{rs} (día del año, hora del día)

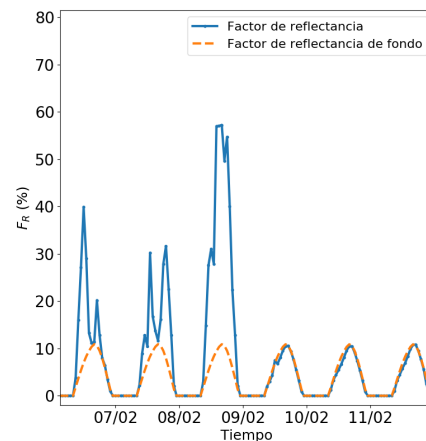
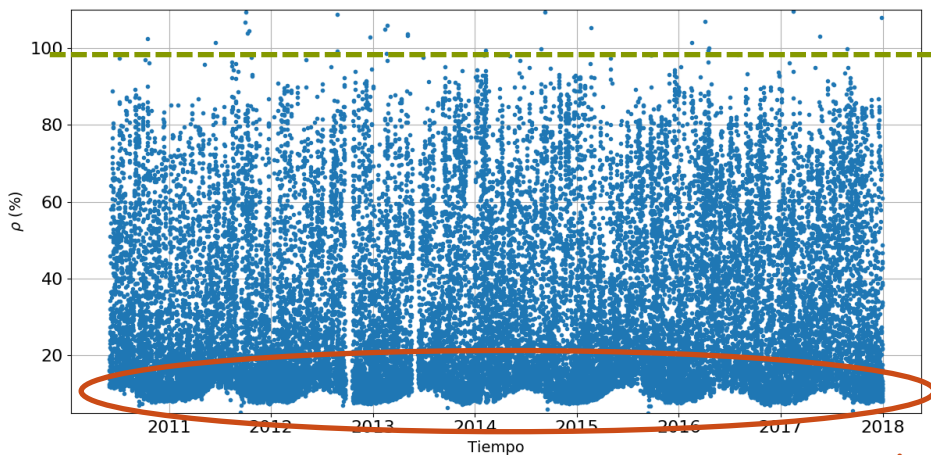
Información satelital

Índice de nubosidad

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$



Rango dinámico



ρ_{max} Asociado a cielo cubierto.
Lo asumimos constante

ρ_o Asociado a cielo despejado. Presenta un ciclo marcado, parametrizado como func. de $\cos \theta_z$ y de γ_{rs} (día del año, hora del día)

Factor de atenuación por nubosidad (GHI)

El factor de atenuación por nubosidad, F , representa al índice de cielo claro, k_{cc}

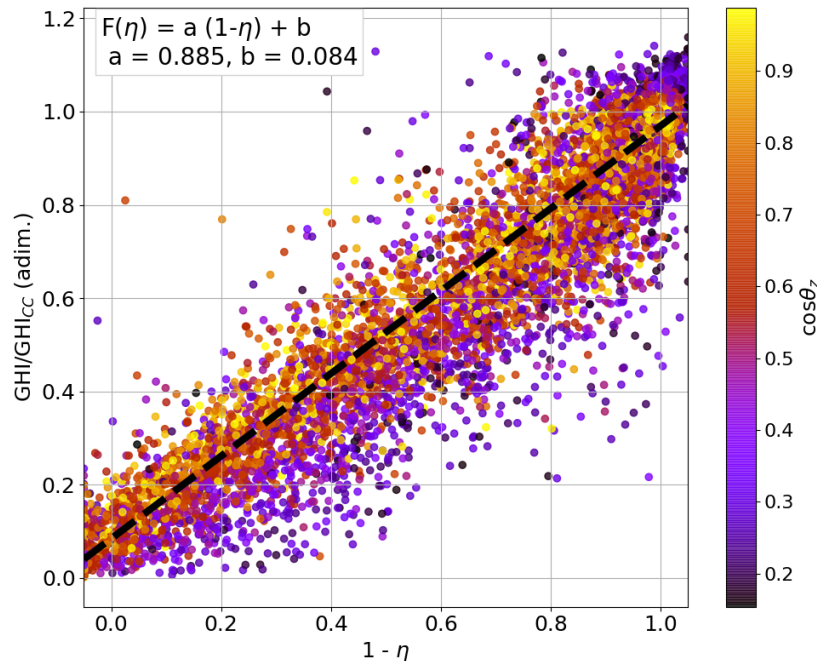
$$I = I_{cc} \times F(\eta) \rightarrow k_{cc} \equiv \frac{I}{I_{cc}} = F(\eta)$$

Factor de atenuación por nubosidad (GHI)

El factor de atenuación por nubosidad, F , representa al índice de cielo claro, k_{cc}

$$I = I_{cc} \times F(\eta) \rightarrow k_{cc} \equiv \frac{I}{I_{cc}} = F(\eta)$$

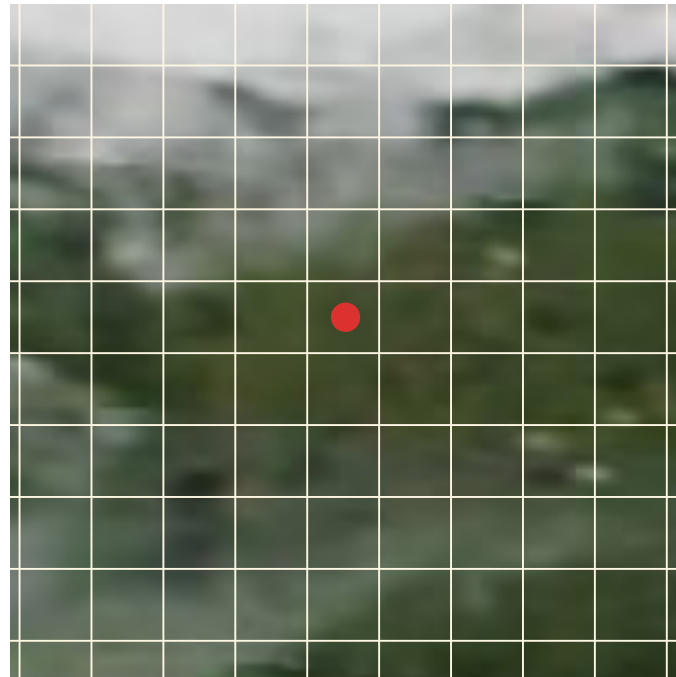
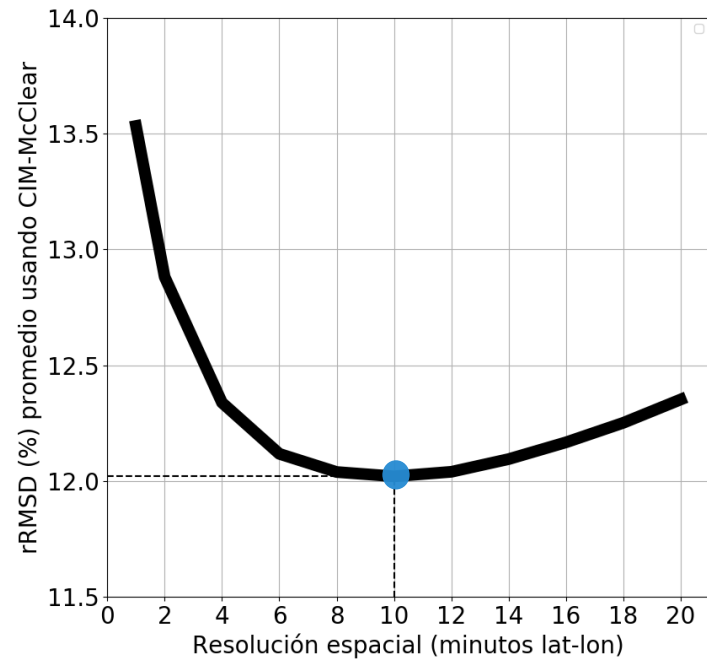
...y tiene comportamiento lineal con $1-\eta$:



$$F(\eta) = a(1 - \eta) + b$$

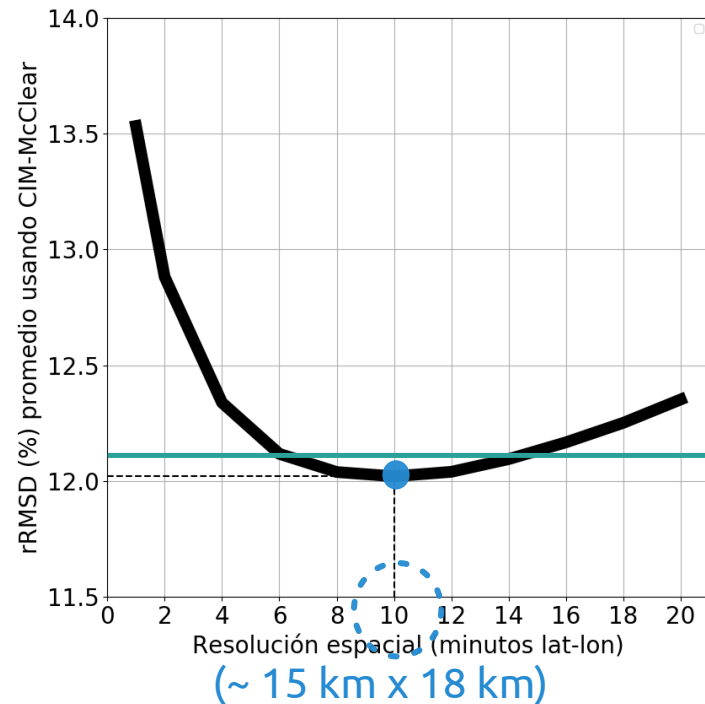
Optimización del modelo CIM

El tamaño óptimo de las celdas es de 10'



Optimización del modelo CIM

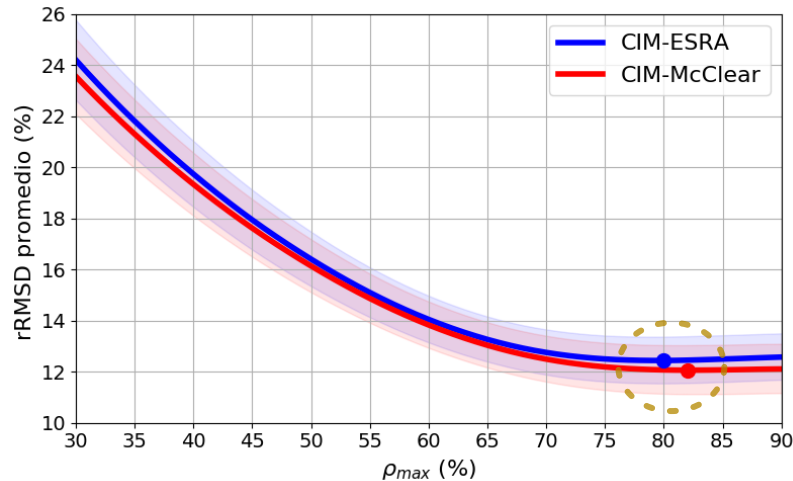
El tamaño óptimo de las celdas es de 10'



Ergodicidad: Promedio espacial capta comportamiento horario

Optimización del modelo CIM (GHI)

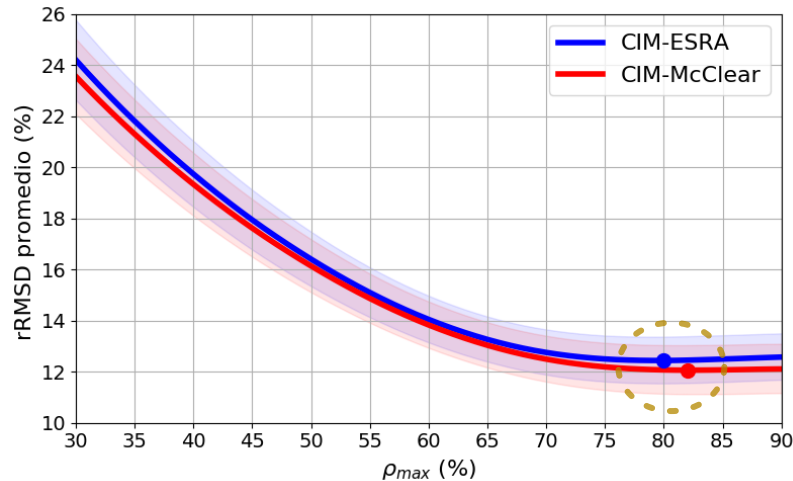
Reflectancia planetaria de saturación



$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$

Optimización del modelo CIM (GHI)

Reflectancia planetaria de saturación



$$\rho_{max} = 80\%$$

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$

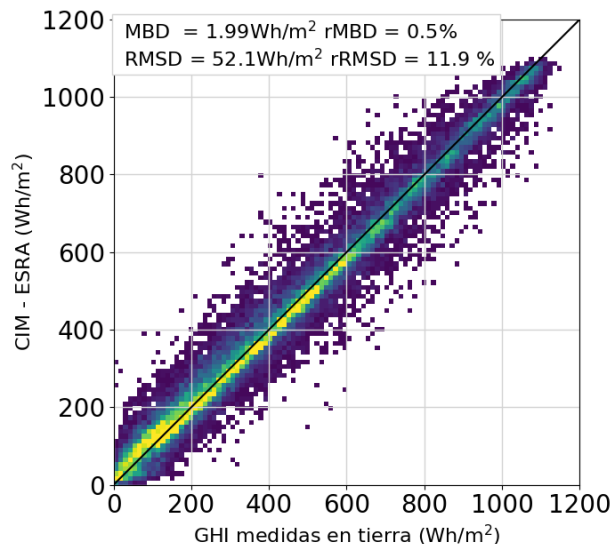
Validación del modelo CIM para GHI

$$I = I_{cc} \times [a(1 - \eta) + b]$$

	CIM-ESRA			CIM-KIP		
	Media	σ (adim.)	σ_{rel} (%)	Media	σ (adim.)	σ_{rel} (%)
a	0.876	0.009	1.0	0.877	0.009	1.0
b	0.088	0.006	6.8	0.088	0.006	6.8

	CIM-McClear			CIM-REST2		
	Media	σ (adim.)	σ_{rel} (%)	Media	σ (adim.)	σ_{rel} (%)
a	0.859	0.013	1.5	0.879	0.011	1.3
b	0.108	0.007	5.6	0.105	0.008	7.5

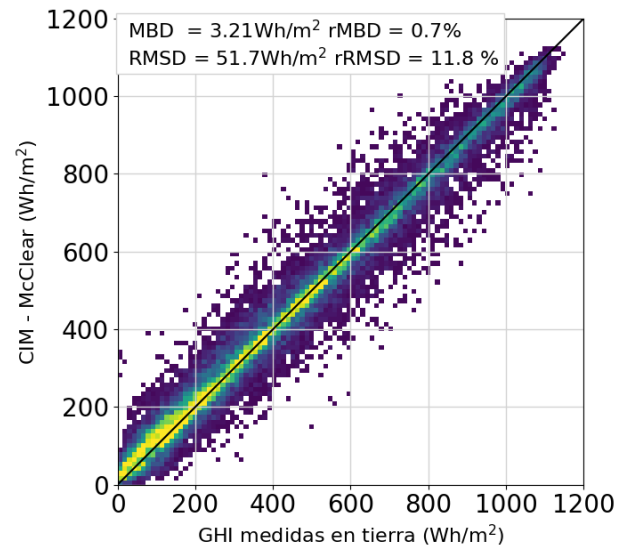
a ~ 0.87, b~0.09
con poca variabilidad espacial



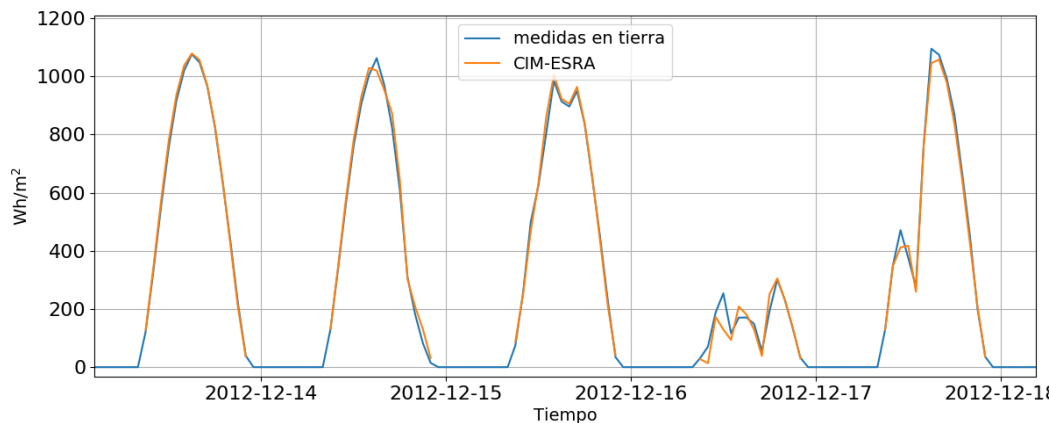
	CIM-ESRA				CIM-KIP			
	Media	Min.	Máx.	σ	Media	Min.	Máx.	σ
rMBD(%)	+0.5	+0.4	+0.6	0.1	+0.7	+0.4	+0.8	0.1
rRMSD(%)	12.1	11.1	14.0	0.9	12.2	11.3	14.1	0.9
KSI (Wh/m²)	7.9	7.1	8.8	0.6	9.2	8.4	10.2	0.6

	CIM-McClear				CIM-REST2			
	Media	Min.	Máx.	σ	Media	Min.	Máx.	σ
rMBD(%)	+0.7	+0.6	+0.9	0.1	+0.9	+0.9	+1.1	0.1
rRMSD(%)	11.8	10.8	13.7	0.9	12.0	11.0	13.9	0.9
KSI (Wh/m²)	8.9	7.4	10.3	0.9	11.0	10.2	12.3	0.6

CIM-ESRA: gran balance
entre simplicidad y precisión

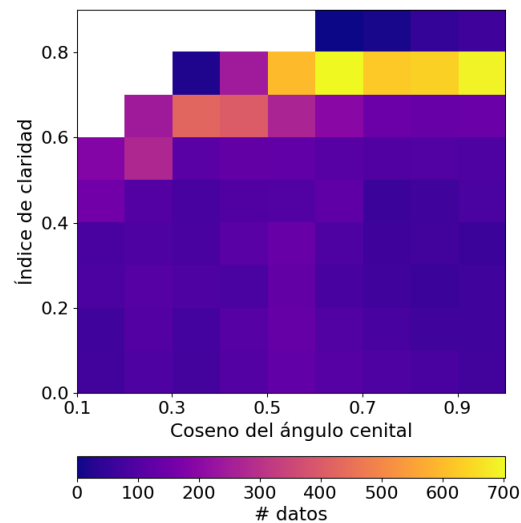
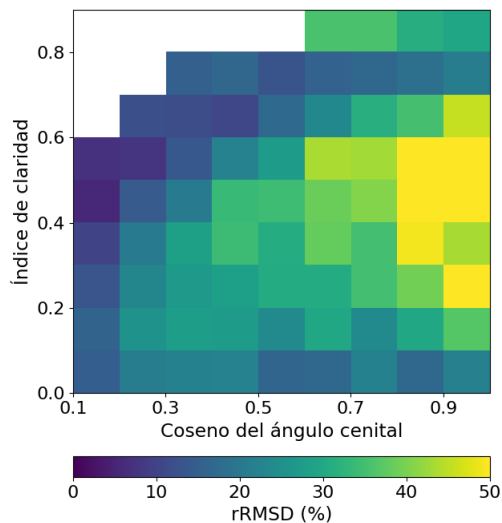
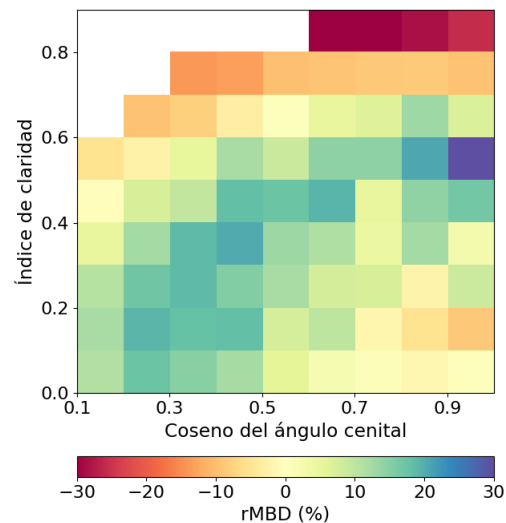


Validación del modelo CIM para GHI



k_t alto $\rightarrow$ alta irradiación (cielo despejado)

$\cos \theta_z$ alto $\rightarrow$ mayor altura solar (mediodía solar)

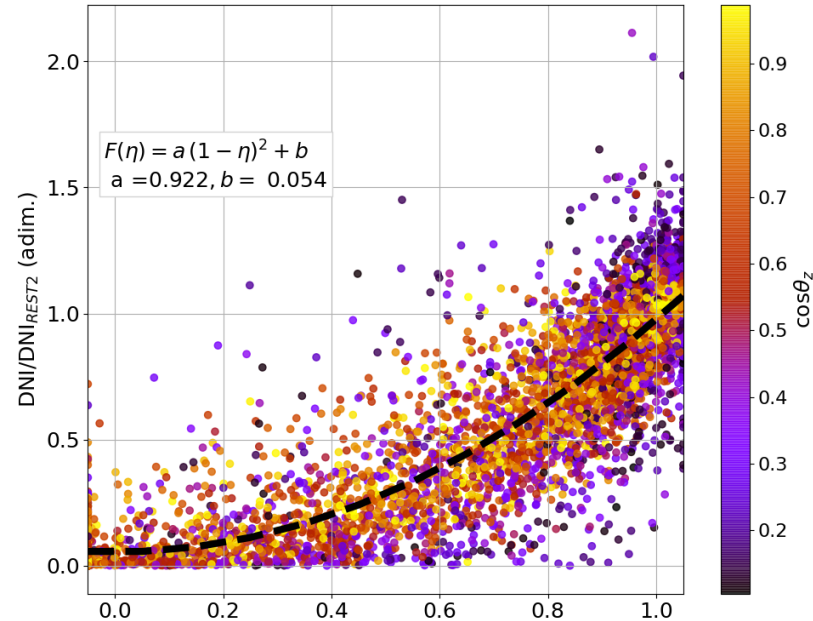


con respecto a la media de las medidas, 449 Wh/m²

Optimización modelo CIM (DNI)

Optimización modelo CIM (DNI)

El factor de atenuación por nubosidad es cuadrático

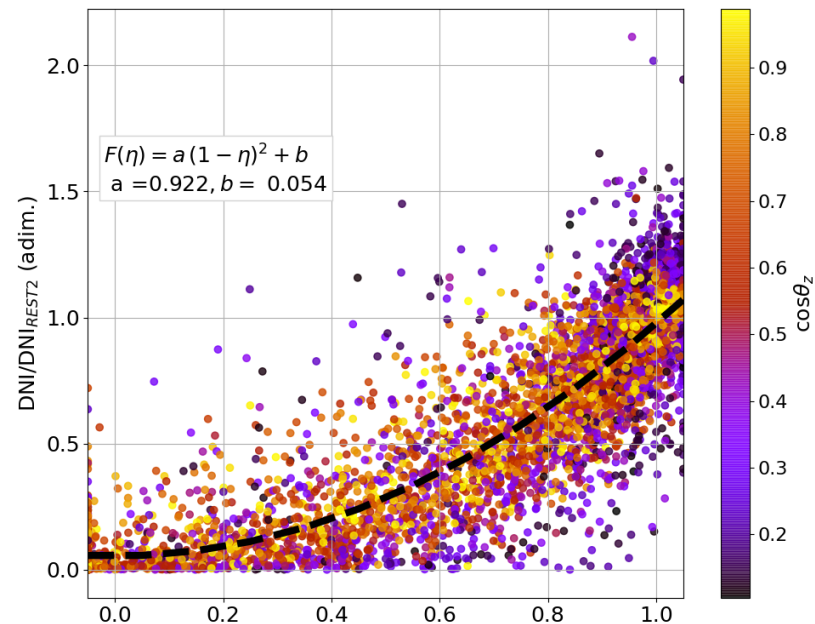


$$\hat{F}(\hat{\eta}) = \hat{a} (1 - \hat{\eta})^2 + \hat{b}$$

$$\frac{I}{I_{cc}} = F(\eta)$$

Optimización modelo CIM (DNI)

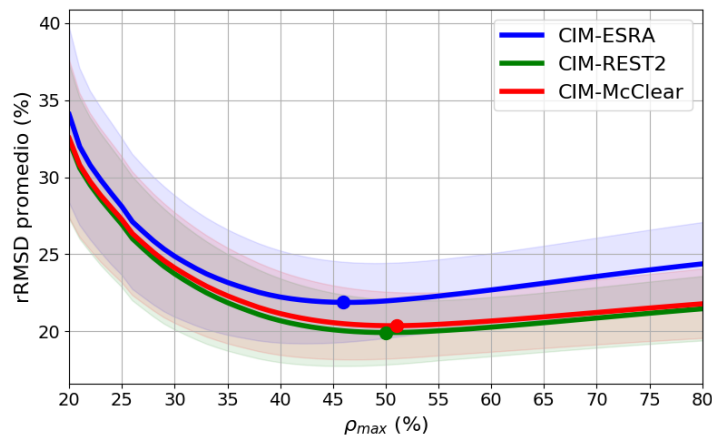
El factor de atenuación por nubosidad es cuadrático



$$\hat{F}(\hat{\eta}) = \hat{a} (1 - \hat{\eta})^2 + \hat{b}$$

$$\frac{I}{I_{cc}} = F(\eta)$$

El efecto de saturación se da con menor nubosidad (menor reflectancia planetaria comparado con GHI)



$$\rho_{max} = 50\%$$

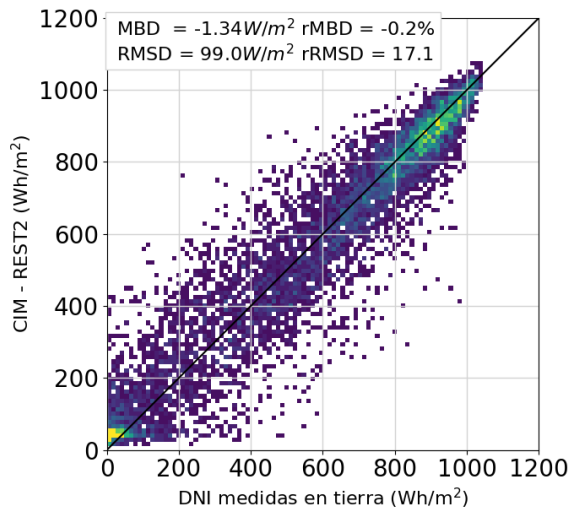
$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_{max} - \rho_o}$$

Validación del modelo CIM para DNI

$$I = I_{cc} \times [a(1 - \eta)^2 + b]$$

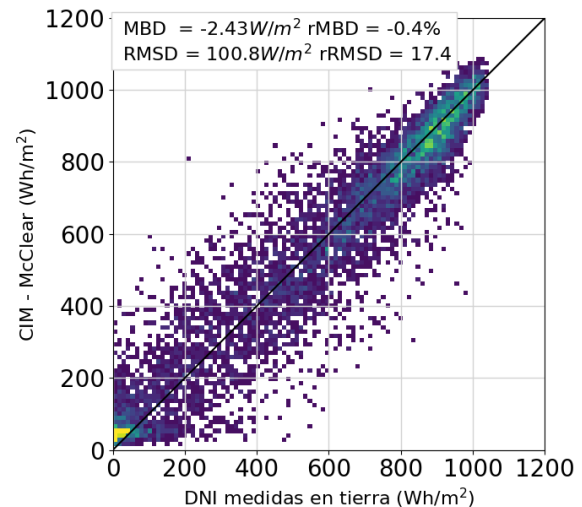
Sitio	LE	MS	LU	Promedio
Modelo CIM-ESRA				
a	0.879 (0.003)	0.844 (0.002)	0.861 (0.004)	0.867 (2.1 %)
b	0.027 (0.003)	0.038 (0.002)	0.021 (0.004)	0.026 (31.0 %)
Modelo CIM-McClear				
a	0.875 (0.004)	0.836 (0.002)	0.901 (0.005)	0.882 (3.8 %)
b	0.061 (0.004)	0.061 (0.002)	0.052 (0.005)	0.057 (8.6 %)
Modelo CIM-REST-2				
a	0.922 (0.004)	0.859 (0.002)	0.899 (0.005)	0.905 (3.6 %)
b	0.054 (0.004)	0.063 (0.002)	0.045 (0.005)	0.051 (16.7 %)

a ~ 0.89, b ~ 0.04
poca variabilidad espacial



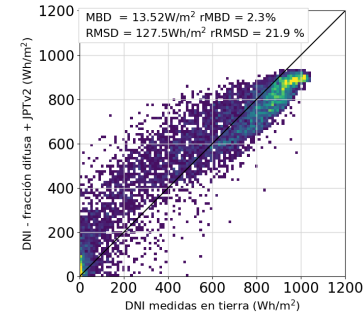
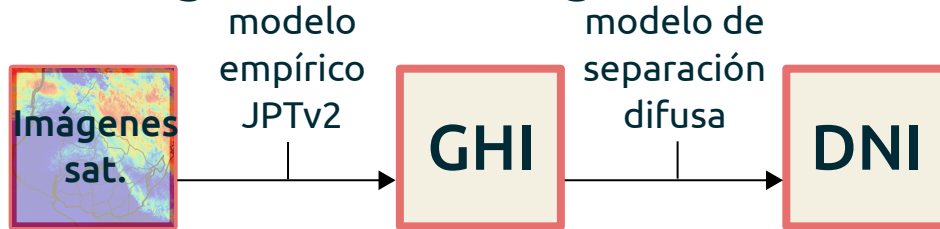
Sitio	LE	MS	LU	Promedio
Modelo CIM-ESRA				
rMBD(%)	+0.2 (0.4)	+0.1 (0.4)	+0.1 (0.6)	+0.1 (0.1)
rRMSD(%)	18.0 (0.3)	24.0 (0.3)	20.1 (0.4)	19.6 (3.0)
KSI(Wh/m²)	21.9 (1.5)	18.5 (1.4)	23.7 (2.1)	22.3 (2.6)
Modelo CIM-McClear				
rMBD(%)	-0.4 (0.4)	-0.1 (0.4)	-0.7 (0.6)	-0.5 (0.3)
rRMSD(%)	17.4 (0.3)	22.8 (0.3)	19.8 (0.4)	19.1 (2.7)
KSI(Wh/m²)	15.5 (1.3)	19.4 (1.2)	21.0 (1.7)	18.4 (2.8)
Modelo CIM-REST2				
rMBD(%)	-0.2 (0.4)	+0.1 (0.4)	0.0 (0.5)	-0.1 (0.2)
rRMSD(%)	17.1 (0.3)	22.4 (0.3)	18.7 (0.4)	18.4 (2.7)
KSI(Wh/m²)	14.0 (1.5)	18.6 (1.3)	16.8 (2.0)	15.8 (2.3)
# datos	7622	12956	4376	24934
$\langle I_b \rangle$ (Wh/m²)	579.3 (3.6)	472.4 (3.1)	548.0 (4.7)	553 (55)

CIM-REST2 es el más preciso



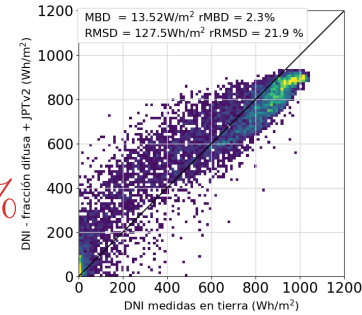
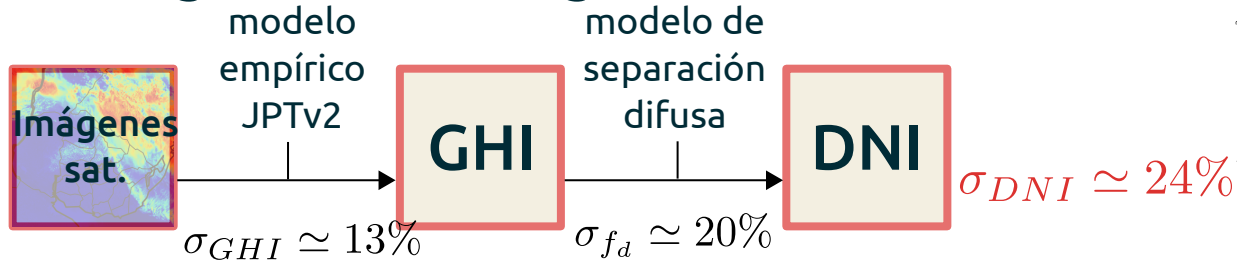
Comparación con estrategia actual (DNI)

estrategia fenomenológica:



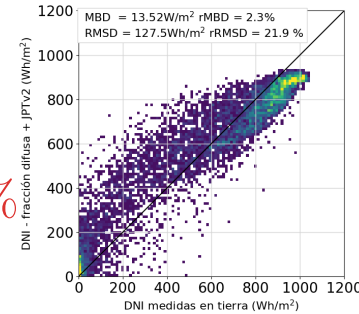
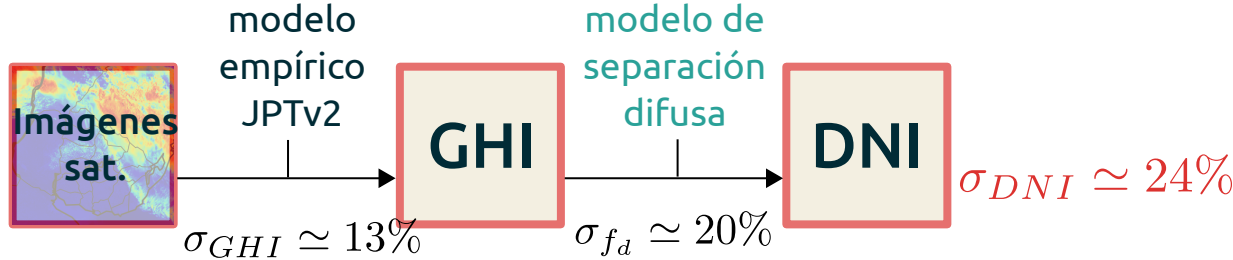
Comparación con estrategia actual (DNI)

estrategia fenomenológica:



Comparación con estrategia actual (DNI)

estrategia fenomenológica:



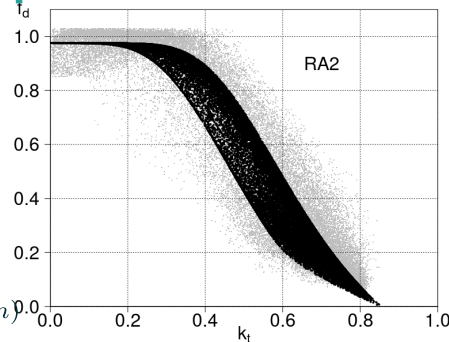
modelo de separación difusa

$$f_d = \frac{I_{dh}}{I_h}$$

estima fracción
difusa (f_d)
con expresión
fenomenológica

-expresión de Ruiz-Arias
seleccionada entre
10 parametrizaciones
-evaluada y ajustada
localmente, en función de
 k_t y m .

$$f_d = a_0 - a_1 e^{-\exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 m)}$$

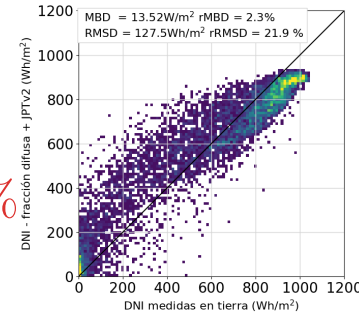
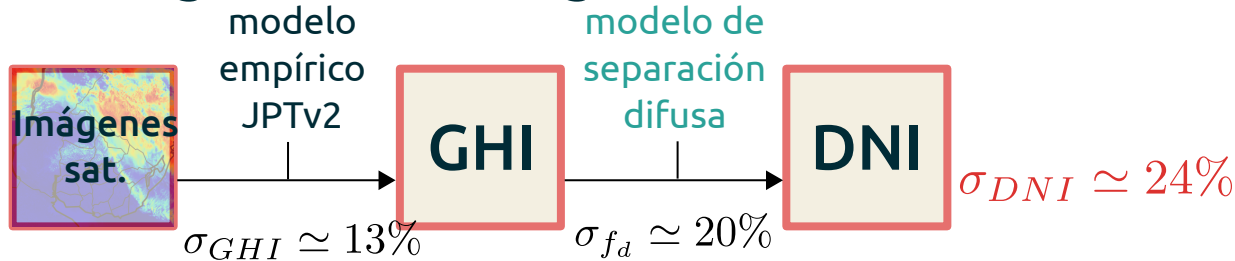


con I_g y f_d se estima
la irradiación difusa
y luego la directa

$$I_b = \frac{I_h - I_{dh}}{\cos \theta_z}$$

Comparación con estrategia actual (DNI)

estrategia fenomenológica:



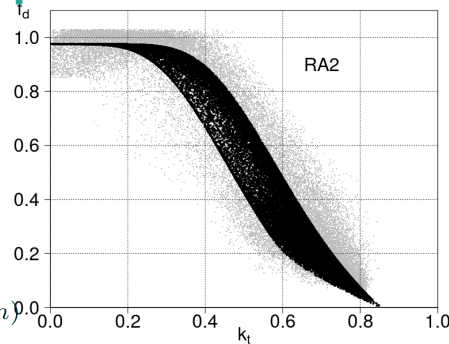
modelo de separación difusa

$$f_d = \frac{I_{dh}}{I_h}$$

estima fracción
difusa (f_d)
con expresión
fenomenológica

-expresión de Ruiz-Arias
seleccionada entre
10 parametrizaciones
-evaluada y ajustada
localmente, en función de
 k_t y m .

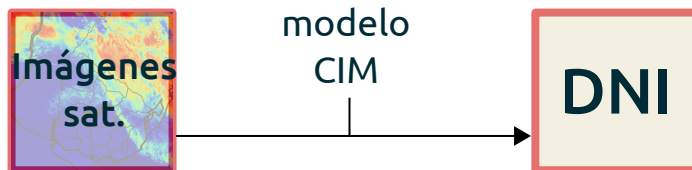
$$f_d = a_0 - a_1 e^{-\exp(a_2 + a_3 k_t + a_4 m)}$$



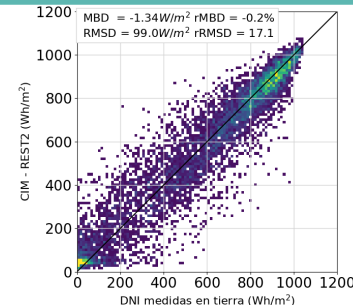
con I_g y f_d se estima
la irradiación difusa
y luego la directa

$$I_b = \frac{I_h - I_{dh}}{\cos \theta_z}$$

estrategia CIM:



$$\sigma_{DNI} \simeq 18\%$$

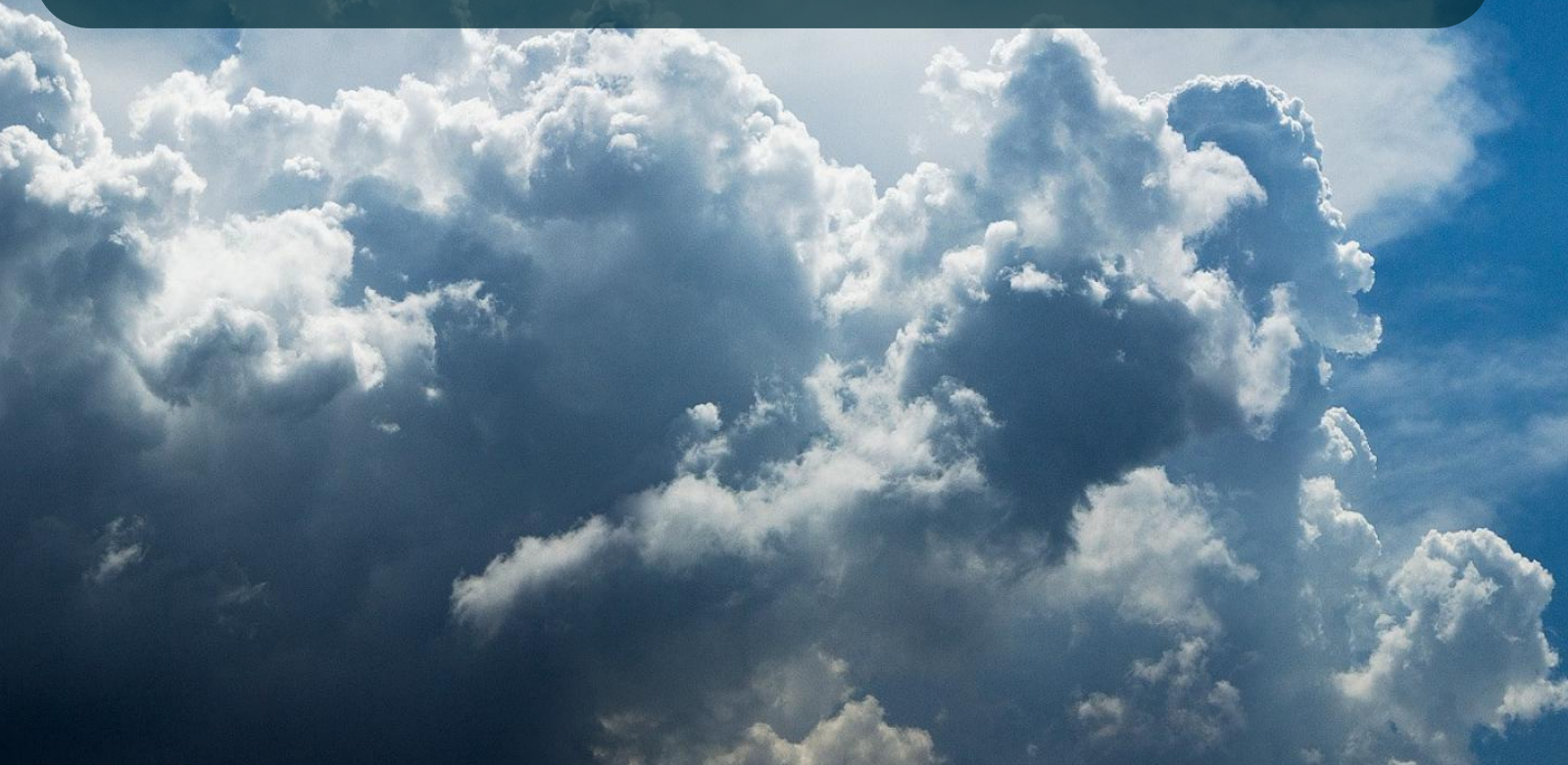


Modelos híbridos - Conclusiones



Modelos híbridos - Conclusiones

Se desarrollaron modelos híbridos de irradiación solar horaria, localmente ajustados, de gran desempeño y bajo costo computacional basados en modelos de cielo claro e información atmosférica disponible.



Modelos híbridos - Conclusiones

Se desarrollaron modelos híbridos de irradiación solar horaria, localmente ajustados, de gran desempeño y bajo costo computacional basados en modelos de cielo claro e información atmosférica disponible.

Irradiación global

- rRMSD ~12% y |rMBD|<1%
- modelo CIM supera desempeño de otros modelos e igualan al del modelo empírico actual (JPTv2), pero sin inconsistencias
- baja variabilidad espacial de parámetros ajustados permite extrapolación a toda la Pampa Húmeda

Modelos híbridos - Conclusiones

Se desarrollaron modelos híbridos de irradiación solar horaria, localmente ajustados, de gran desempeño y bajo costo computacional basados en modelos de cielo claro e información atmosférica disponible.

Irradiación global

- rRMSD $\sim 12\%$ y $|rMBD| < 1\%$
- modelo CIM supera desempeño de otros modelos e igualan al del modelo empírico actual (JPTv2), pero sin inconsistencias
- baja variabilidad espacial de parámetros ajustados permite extrapolación a toda la Pampa Húmeda

Irradiación directa

- rRMSD $< 20\%$ y $|rMBD| < 1\%$
- mejor desempeño que cadena fenomenológica usada actualmente
- robustez de parámetros permite extrapolabilidad
- estrategia empírica es la más conveniente para modelar DNI en la región

Trabajo a futuro

-modelado espectral en cielo claro



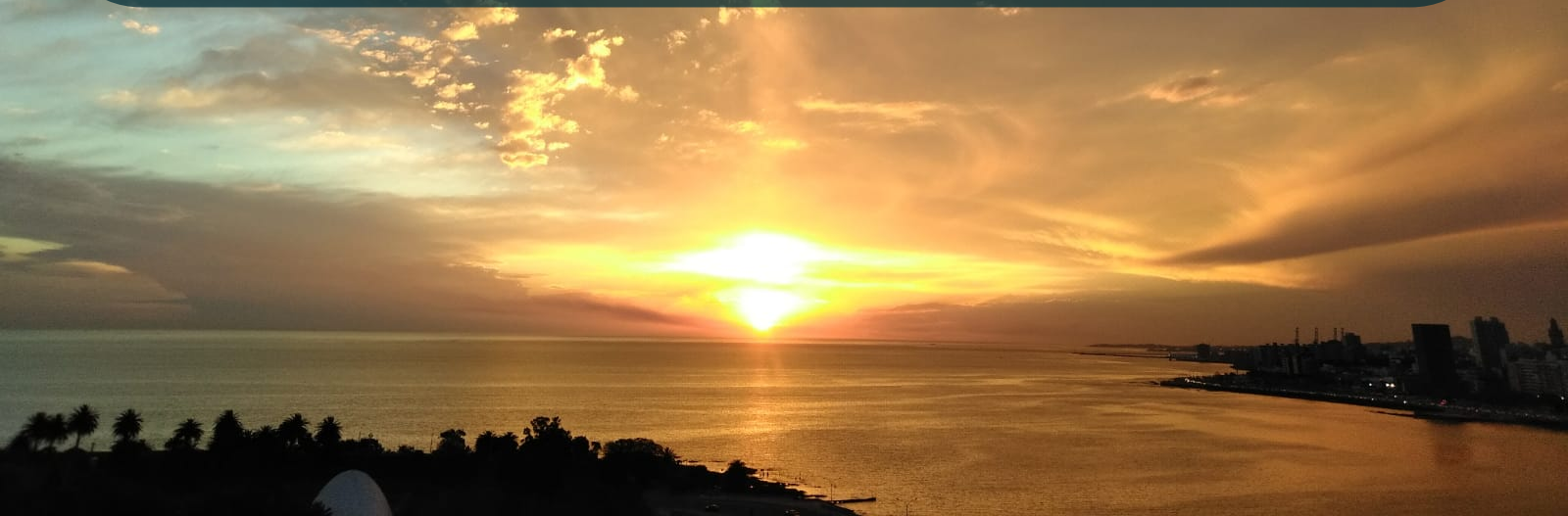
Trabajo a futuro

- modelado espectral en cielo claro
- mejoras al tratamiento de nubes en modelos CIM (geometría, IR)



Trabajo a futuro

- modelado espectral en cielo claro
- mejoras al tratamiento de nubes en modelos CIM (geometría, IR)
- satélite GOES-16 (2018) permite:
 - mayor resolución temporal (10mins)
 - incorporación canales espectrales VIS



Trabajo a futuro

- modelado espectral en cielo claro
- mejoras al tratamiento de nubes en modelos CIM (geometría, IR)
- satélite GOES-16 (2018) permite:
 - mayor resolución temporal (10mins)
 - incorporación canales espectrales VIS
- modelado CIM en bandas espectrales relevantes (UV, PAR)



Trabajo a futuro

- modelado espectral en cielo claro
- mejoras al tratamiento de nubes en modelos CIM (geometría, IR)
- satélite GOES-16 (2018) permite:
 - mayor resolución temporal (10mins)
 - incorporación canales espectrales VIS
- modelado CIM en bandas espectrales relevantes (UV, PAR)
- ampliación del área de cobertura de modelos CIM (Sudamérica)





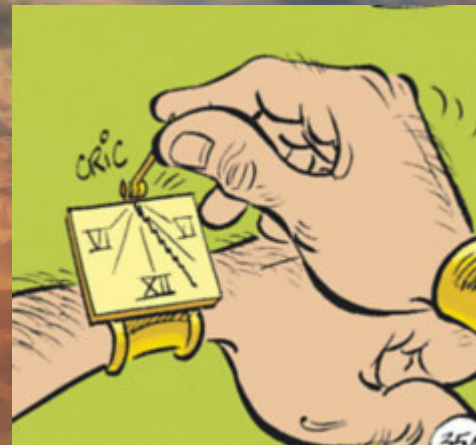
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



LES
LABORATORIO DE
ENERGÍA SOLAR

¡Gracias por la atención!

hora de preguntas...



Agustín Laguarda Cirigliano

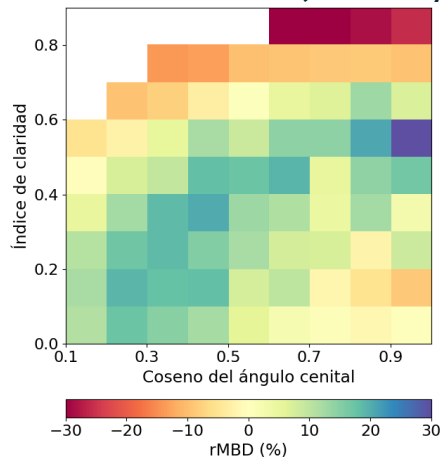
agu.laguarda@gmail.com

Diagramas de desempeño

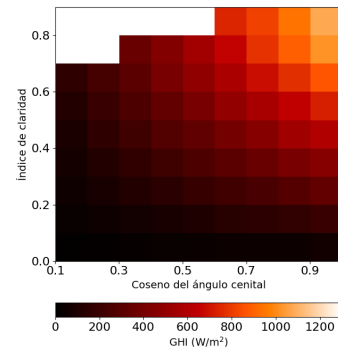
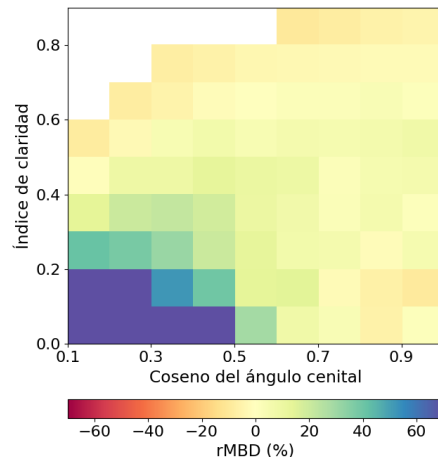
modelo híbrido de GHI (CIM-ESRA en LE)

MBD

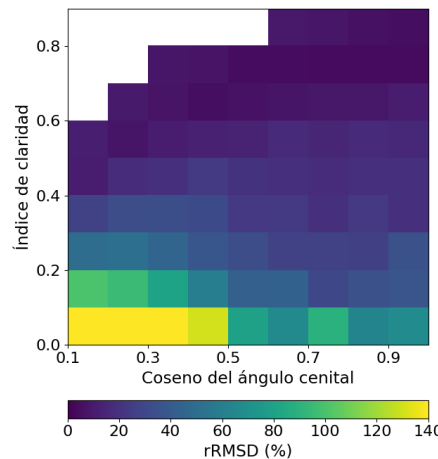
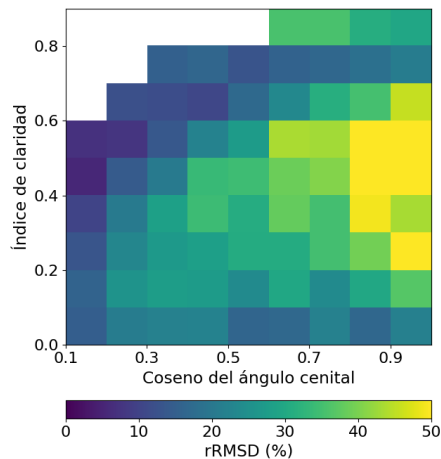
relativo a la media total (449 Wh/m²)



relativo a la media de c/píxel



RMSD



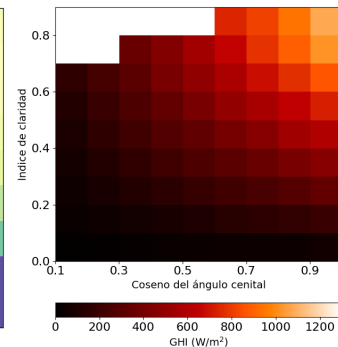
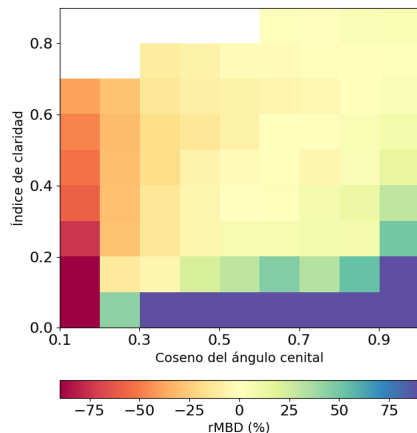
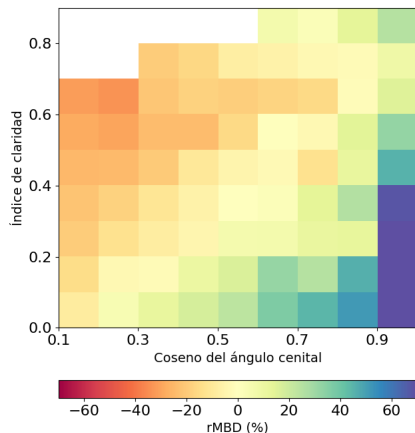
Diagramas de desempeño

modelo de GHI Heliosat-4 (en LE)

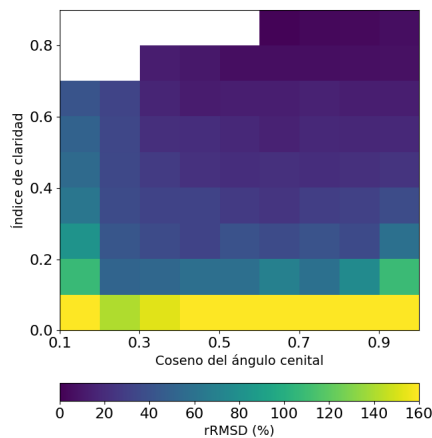
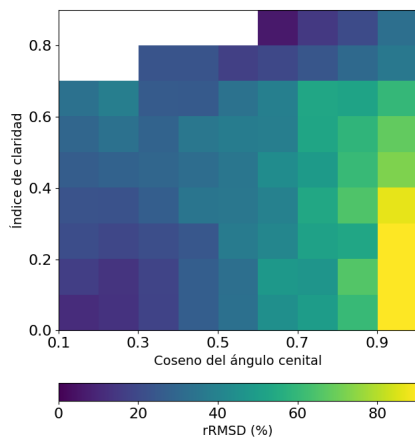
relativo a la media total (449 Wh/m²)

relativo a la media de c/píxel

MBD

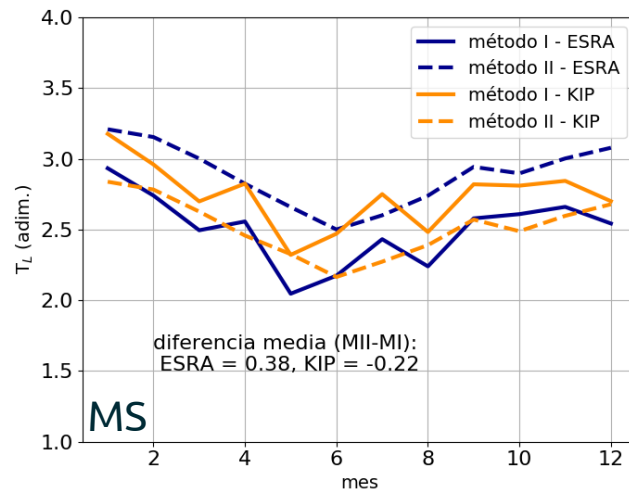
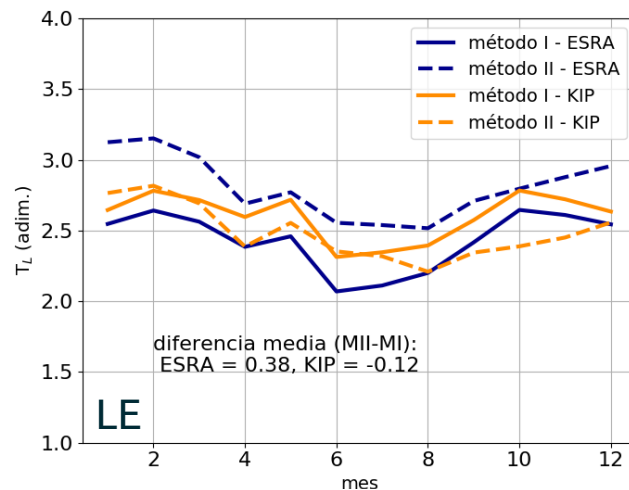
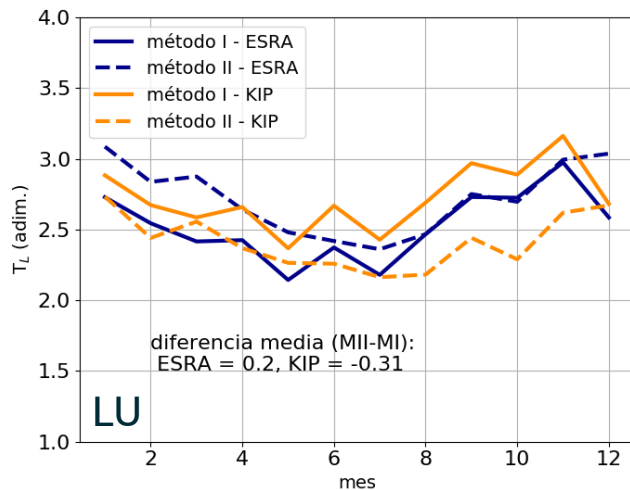


RMSD



Comparación de ciclos T_L

Comparación entre métodos I y II usando ESRA o KIP como modelos de cielo claro de referencia



Validación de modelos en la literatura

modelos de cielo claro

Estudio de validación (cita)	# sitios	# modelos	escala temporal	información atmosférica	área de estudio	modelos recomendados
G12 (Gueymard, 2012)	5	18	1-3 min	AERONET	EUA, Arabia Saudita	REST2, SOLs
E15 (Engerer y Mills, 2015)	14	9	1 min	valores mensuales de SoDa	Australia	SOLs, REST2 ESRA
I16 (Ineichen, 2016)	22	7	1 h	CAMS	Europa, África, Israel	McClear REST2
A19 (Antonanzas-Torres <i>et al.</i>, 2019)	2	70	1 min	AERONET	Holanda, Francia	ESRA, KIP, REST2, SOLs, McClear y otros

Código	indicadores	ESRA		KIP		SOLs		REST2		McClear	
		GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI
G12	rMBD(%)	+3.1	+3.8	–	–	-1.6	+0.8	-0.2	-0.3	–	–
	rRMSD(%)	4.5	5.6	–	–	2.8	2.6	1.5	1.4	–	–
E15	rMBD(%)	+4.6	-0.3	-2.0	-6.0	-2.2	-4.5	+0.3	-0.3	–	–
	rRMSD(%)	5.7	6.4	4.8	7.8	5.8	6.9	5.1	6.2	–	–
I16	rMBD(%)	-7.1	-15.7	–	–	-0.2	-16.4	-4.5	-15.8	+2.9	-0.7
	rRMSD(%)	8.1	16.6	–	–	2.8	17.5	5.4	16.6	3.4	4.1
A19	rMBD(%)	+0.8	+1.6	-0.8	-2.8	-0.3	+2.2	-0.4	-0.3	+1.6	+3.3
	rRMSD(%)	2.9	8.0	2.7	7.9	3.2	8.5	3.1	7.9	2.9	9.4

Validación de modelos en la literatura

modelos de
modelos satelitales

GHI

Validaciones horarias de GHI				
Modelo	rMBD	rRMSD	sitios de evaluación	referencia
Heliosat-2	-6.0	30.0	35 sitios en Europa occidental	Rigollier <i>et al.</i> (2004)
Heliosat-3	+1.0	20.0	18 sitios en Europa	Ineichen (2014)
SUNY-v1	-1.0	15.8	10 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2002)
SUNY-v1	-9.0	24.5	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v2	0.0	14.0	10 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2002)
SUNY-v2	-2.0	23.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v3	+1.9	27.8	18 sitios en Canada	Djebbar <i>et al.</i> (2012)
SUNY-v3	+2.5	19.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v4	0.0	16.5	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SolarGIS	0.0	17.0	18 sitios en Europa	Ineichen (2014)
NSRDB(v2)	+0.1	22.9	9 sitios en EUA	Habte <i>et al.</i> (2017)
Heliosat-4	+3.5	18.5	Francia y Suiza	www.soda-pro.com/web-services
HelioClim-v5	+1.1	17.0	Francia y Suiza	www.soda-pro.com/web-services
Heliosat-2	+0.4	20.0	2 estaciones Brasil	Martins y Pereira (2003)
SUNY-v1	+0.8	31.0	2 estaciones Brasil	Martins y Pereira (2003)
Brasil-SR	+6.0	25.7	2 estaciones Brasil	Martins y Pereira (2003)
Heliosat-4	-2.5	26.5	Bs As y Florianópolis	www.soda-pro.com/web-services
HelioClimv5	+1.0	20.5	Bs As y Florianópolis	www.soda-pro.com/web-services
GL1.2	-2.1	19.9	5 sitios RMCIS en Uruguay	Trabajo propio no publicado
JPT	+1.6	17.8	7 sitios en Uruguay	Alonso-Suárez <i>et al.</i> (2012)
BD-JPT	+0.1	13.3	7 sitios en Uruguay	Alonso-Suárez <i>et al.</i> (2012)
JPTv2	+0.1	12.0	12 sitios en Uruguay	Alonso-Suárez (2017)

DNI

Validaciones horarias de DNI				
Modelo	rMBD	rRMSD	sitios de evaluación	referencia
SUNY-v1	-4.1	35.1	10 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2002)
SUNY-v1	-18.0	52.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v2	-2.4	29.9	10 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2002)
SUNY-v2	+6.8	31.0	4 sitios en California	Nonnenmacher <i>et al.</i> (2014)
SUNY-v2	-2.5	48.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v3	+14.3	67.2	3 sitios en Canada	Djebbar <i>et al.</i> (2012)
SUNY-v3	+3.5	38.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SUNY-v4	-0.5	33.0	8 sitios en EUA	Perez <i>et al.</i> (2015)
SolarGIS	-2.0	34.1	18 sitios en Europa	Ineichen (2014)
NSRDB(v2)	+4.5	33.2	9 sitios en EUA	Habte <i>et al.</i> (2017)
Heliosat-3 ¹	+6.0	47.4	18 sitios en Europa	Ineichen (2014)
Heliosat-4	+0.5	28.0	Francia, Suiza	www.soda-pro.com/web-services
Heliosat-4	0.0	39.0	Florianópolis	www.soda-pro.com/web-services

Modelos de cielo claro

Selección de medidas de cielo claro

Algoritmo para GHI

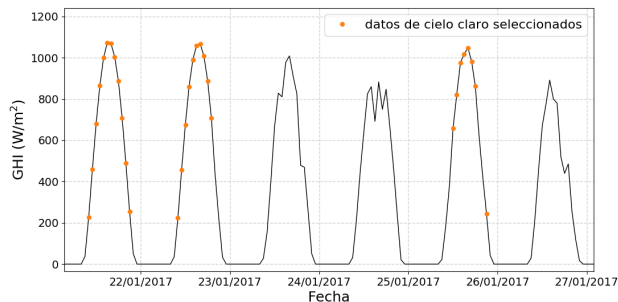
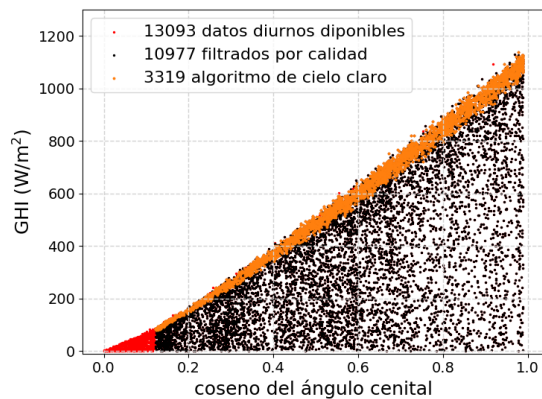
i. índice de claridad modificado > 0.74 (62% desc.)

$$\text{Índice de claridad: } k_t \equiv \frac{I_h}{I_{sc} F_n}$$

ii. 40% de datos deben superar i en c/día (13% desc.)

iii. variabilidad diaria $< 10\%$ (27% desc.)

25% de datos superan algoritmo



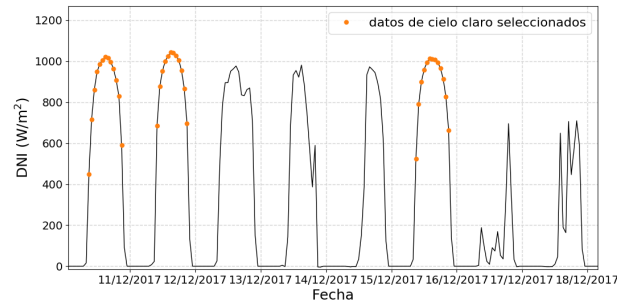
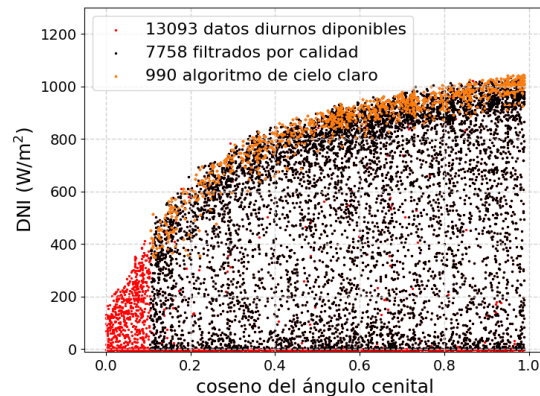
Algoritmo para DNI

i. índice de claridad diario > 0.52 (72% desc.)

ii. $I_b > 350 \text{ Wh/m}^2$ (2% desc.)

iii. Inspección visual (67% desc.)

10% de datos superan algoritmo



CIM-REST2 de DNI

