

## Modelos de Cielo Claro

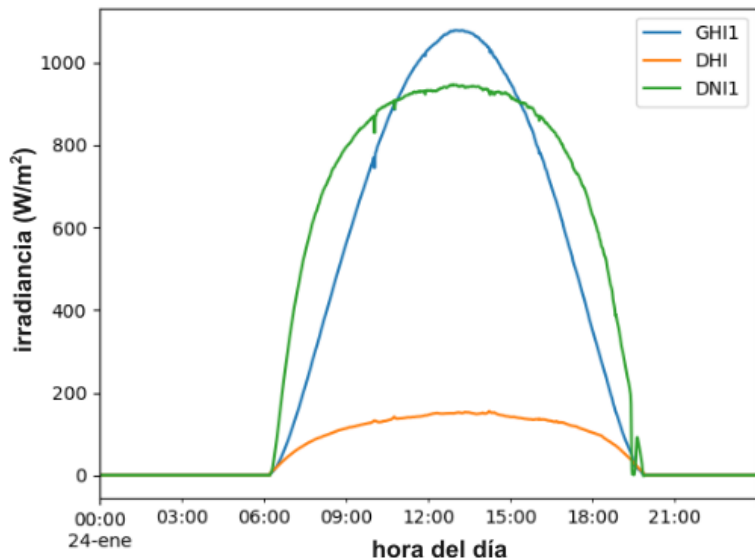


## Fundamentos del Recurso Solar 2024

Laboratorio de Energía Solar  
FING | CENUR-LN  
Universidad de la República

Rodrigo Alonso-Suárez  
[r.alonso.suarez@gmail.com](mailto:r.alonso.suarez@gmail.com)

## IRRADIANCIA DE CIELO DESPEJADO:



- Por qué necesitamos modelos para estimar la radiación de cielo despejado?
- > Base para estimación y predicción en condiciones todo cielo, control de calidad.

## ESTRATEGIAS DE MODELADO

Diferentes aplicaciones tienen diferentes requerimientos (espectro, componentes, precisión, resolución etc.). La elección del modelo más adecuado en cada caso depende de varios factores, algunos externos (como el acceso a información apropiada)

### modelos puramente físicos:

Estiman perfil radiativo en todas las capas de la atm. Usualmente basados en ecuaciones de transferencia radiante (RTM). Necesarios en estudios climatología y meteorología (calentamiento de la atm.). Precisos y computacionalmente costosos. Requieren conocimiento detallado de la atmósfera

### modelos empíricos:

Correlaciones derivadas de regresiones. Asumen que RS deriva de otras cantidades indeptes. (temperatura, horas de luz, duración del día, etc.) simplificados. No recomendados a nivel intradiario

### parametrizaciones de modelos físicos:

Analíticos o tablas de referencia. Operacionales a gran escala espacio-temporal. Opciones con diferentes complejidades Tan precisos como sea su información de entrada

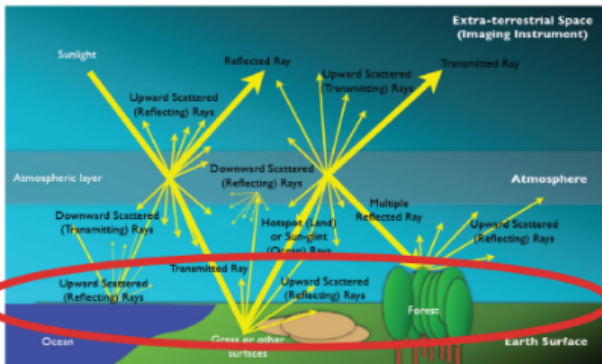
**~ pueden ser muy precisos y  $10^5$  veces más rápidos que modelos RTM**

## ESTRATEGIAS DE MODELADO

Procesos más relevantes:

- dispersión molecular
- dispersión por aerosoles
- absorción por aerosoles
- absorción por vapor de agua
- absorción por ozono
- abs. por otros gases

variabilidad	impacto
-	+
++	++
++	-
++	+
+	-
-	-



el foco en la superficie  
y en todo el espectro  
(banda ancha)  
permite simplificaciones

Nomenclatura:

dispersión
+ absorción
atenuación/extinción
Atmósfera de Rayleigh = atmósfera sin aerosoles ni H <sub>2</sub> O (teórica)

## ESTRATEGIAS DE MODELADO

a nivel espectral  
ya vimos que:

$$\tau_{\lambda} = G_{\lambda,b}/G_{\lambda,0}$$

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda,R} \times \tau_{\lambda,a} \times \tau_{\lambda,w} \times \tau_{\lambda,o} \times \tau_{\lambda,g}$$

$$\tau_{\lambda,i} = \exp(-k_{\lambda,i} m_i)$$

los procesos son independientes a nivel espectral

### Modelos de banda ancha utilizan diferentes estrategias:

Producto de transmitancias :

$$\tau = \tau_R \times \tau_a \times \tau_w \times \tau_o \times \tau_g$$

No es en general válido, pero se asume

(Las transmitancias totales de cada efecto alteran el espectro en cada capa de la atm.)

$$\tau_i = \exp(-k_i(m) m)$$

Se utiliza sin grandes errores (excepto alt.sol extremas):

Profundidad óptica total:

$$\tau = \exp(-\delta(m) m)$$

$$\delta(m) = \frac{1}{m} \log \left[ \frac{G_0}{\int_{\lambda} G_{\lambda,0} \tau_{\lambda} d\lambda} \right] \tau^{-1}$$

Profundidad óptica de atmósfera limpia y seca + turbidez:

$$\delta = \delta_R + \delta_T$$

$$G_{b,n} = G_0 \exp(-\delta_R(m) T_L m)$$

$$T_L = \frac{\delta}{\delta_R}$$

Factor de turbidez de Linke

$T_L$  engloba efectos de aerosoles y vapor de agua.  
existen parametrizaciones de prof. óptica de Rayleigh  
 $T_L$  se interpreta como el nro de atmósferas limpias y secas equivalente

## ALGUNOS MODELOS EXISTENTES

modelo	cita principal	descripción básica	variables atm. requeridas
<b>ESRA</b>	Rigollier et al.(2000) <sup>1</sup>	estima transmitancia global para DNI y parametriza DHI con $T_L$	$T_L$
<b>KIP</b>	Ineichen y Perez (2002) <sup>2</sup>	propone expresiones empíricas para GHI y DNI en func. de $T_L$	$T_L$
<b>SOLs</b>	Ineichen (2008) <sup>3</sup>	parametrización simple del modelo de transferencia (RTM) radiante SOLIS	$AOD_{700}, w$
<b>REST2</b>	Gueymard (2008) <sup>4</sup>	Producto de transmitancias en dos bandas espectrales	$\beta, \alpha_1, \alpha_2, w, \rho_{g1}, \rho_{g2}, [O_3], u_n$
<b>McClea</b>	Lefevre et al. (2013) <sup>5</sup>	Tablas de ábacos a partir del RTM Libradtran.	$AOD_{550}, \alpha, w, [O_3]$

su desempeño puede ser sensible a características locales:

-clima y geografía locales

-disponibilidad de información atmosférica de calidad

<sup>1</sup>SoL. En. 2000. Vol. 77, P: 159

<sup>2</sup>SoL. En. 2002. Vol. 73, P: 151

<sup>3</sup>SoL. En. 2008. Vol. 82, P: 758

<sup>4</sup>SoL. En. 2008. Vol. 82, P: 272

<sup>5</sup>Atm. Meas. Tech. Vol. 6, P: 2403

## MODELO ESRA:

se basa en un único parámetro -> Turbidez de Linke ( $T_L$ )

Radiación directa:

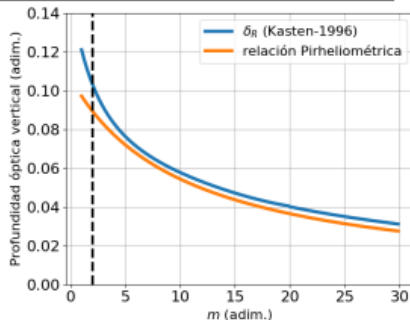
$$I_b = I_0 e^{-m \delta_R(m) T_L}$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot F_n$$

profundidad óptica vertical  
total efectiva

Profundidad óptica de una atmósfera  
limpia y seca

$$1/\delta_R(m) = \begin{cases} 6.62960 + 1.75130 m - 0.12020 m^2 \\ \quad + 0.00650 m^3 - 0.00013 m^4 & , m \leq 20 \\ 10.6 + 0.718 m & , m > 20 \end{cases}$$



## MODELO ESRA:

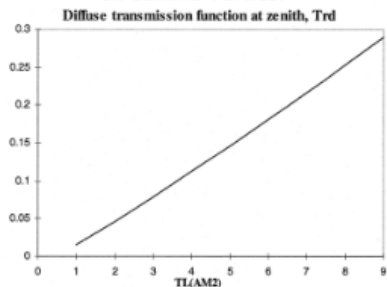
Radiación difusa:

$$I_{dh} = I_0 \overset{\wedge}{T_z}(T_L) \overset{\wedge}{F_d}(\theta_z, T_L)$$

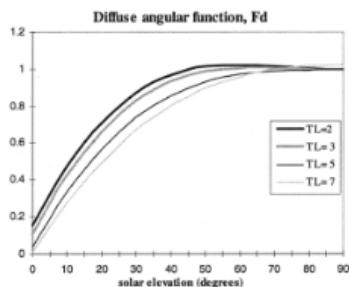
$$I_0 = I_{sc} \cdot F_n$$

detalles de cada factor en NRS

Transmitancia difusa efectiva en camino vertical



modificador angular



$$T_z(\hat{T}_L) = -1,5843 \times 10^{-2} + 3,0543 \times 10^{-2} \hat{T}_L + 3,797 \times 10^{-4} \hat{T}_L^2. \quad (3.33)$$

$$F_d(\theta_z, \hat{T}_L) = A_0(\hat{T}_L) + A_1(\hat{T}_L) \cos \theta_z + A_2(\hat{T}_L) \cos^2 \theta_z, \quad (3.34)$$

<sup>14</sup>En el modelo original, presentado en [RBW00], las fórmulas se refieren a un  $\hat{T}_L$  que difiere al presentado aquí en una constante multiplicativa, verificándose  $\hat{T}_L = T_L/0,8665$



## Modelo Kasten-Ineichen-Perez

Modelo simple que depende de  $T_L$  de forma empírica

$$G_{bc} = bG_s F_n \exp(-0.09m(T_L - 1))$$

$$G_{hc} = a_1 G_s F_n \cos \theta_z \exp(-a_2 m [f_{h1} + f_{h2}(T_L - 1)])$$

$f_{h1}$ ,  $f_{h2}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $b$  dependen de la altura del sitio

## Modelo McClear

- Se basa en los resultados del modelo RTM Libradtran
- utiliza tablas de referencia (ábacos) y funciones de interpolación
- información de aerosoles, vapor de agua y Ozono de reanálisis y albedo terrestre de información satelital.
- inputs de frec. 3-horaria y resolución 50-150 km
- caja negra. Estimativos disponibles para todo el mundo en

<http://www.soda-pro.com/>

Y varios más...

## mediciones a nivel de superficie: AERONET

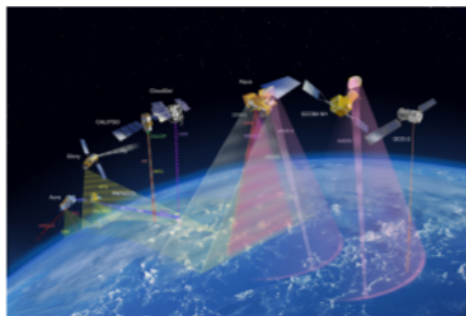


- red de la NOAA expandida por varios colaboradores
- usa radiómetros espectrales con seguidor
- miden radiancia en al menos 6 bandas (VIS-NIR)
- algoritmos de inversión para obtener props. de aerosoles y WV.
- varias colecciones en función de la calidad
- >600 sitios en el mundo



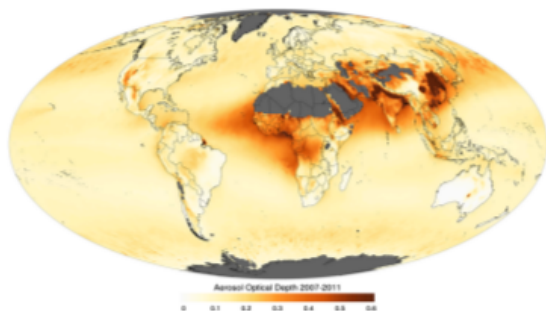
CIMEL CE 318-2

## estimativos de satélites atmosféricos



A-Train

Satélites de órbita baja (700km)  
 8-10 vueltas a la tierra/día  
 gran resolución espacial  
 ej: Aura, Terra, Aqua  
 Instrumentos MODIS o OMI  
 generan estimativos de aerosoles,  
 vapor de agua, entre otros



AOD550 medio estimado por Terra-MODIS

Para un lugar dado obtiene 1 o 2 estimaciones  
 instantáneas / día, desde el ~2000

## bases de reanálisis

Reanálisis: aproximación sistemática que asimila observaciones a modelos numéricos genera información físicamente consistente, sin huecos de alta resolución temporal MERRA-2 (NASA), CAMS (ECMWF).

MERRA-2: información horaria, sin huecos,  
0.625°x0.5° de resolución espacial, desde 1980

Portal Giovanni:



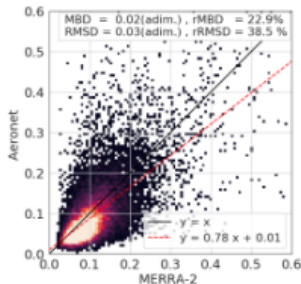
The screenshot shows the Giovanni portal interface with a search filter for 'Platform / Instrument' set to 'MERRA-2 Model (16)'. The table below lists various atmospheric variables available in the dataset.

Variable	Units	Source	Temp. Re	Spat. Re	Begin Date	End Date
Dust Scattering AOT 550 nm - PM 1.0 nm, time average (M2TINXADG v5.12.4)	-	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Black Carbon Column Mass Density, time average (MGTINXAE v5.12.4)	kg m <sup>-2</sup>	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Dust Column Mass Density, time average (MGTINXAE v5.12.4)	kg m <sup>-2</sup>	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
SO2 Column Mass Density (ENSEMBLE), time average (MGTINXAE v5.12.4)	kg m <sup>-2</sup>	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Total Aerosol Extinction AOT 550 nm, time average (MGTINXAE v5.12.4)	-	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Total Aerosol Angstrom parameter (470-870 nm), time average (MGTINXAE v5.12.4)	-	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Total Aerosol Scattering AOT 550 nm, time average (MGTINXAE v5.12.4)	-	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3
Total column ozone, time average (MGTINXSV v5.12.4)	Dobsons	MERRA Model	Hourly	0.5 x 0.625	1980-01-0	2020-03-3

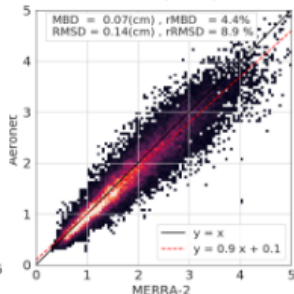
# validación de datos atmosféricos MERRA-2 vs medidas en tierra

## vs Aeronet

### AOD<sub>550</sub>(adim.)

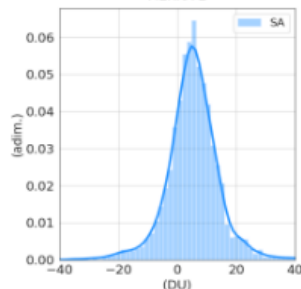
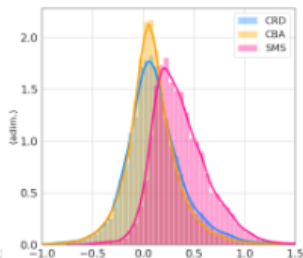
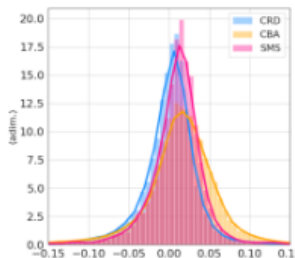
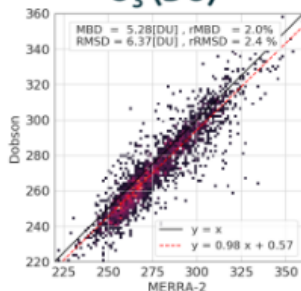


### WV (cm)



## vs DOBSON

### O<sub>3</sub> (DU)



## Turbidez de Linke

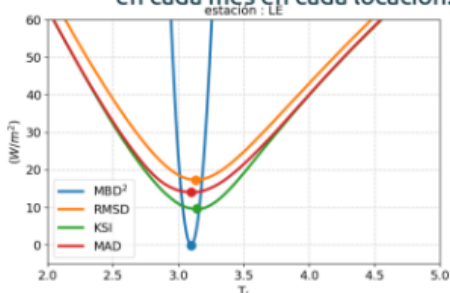
magnitud indirecta, varias estrategias para estimarlo

-> Si se cuenta con medidas de DNI: (mejor opción):

$$T_L = \frac{1}{\delta(m)m} \log \left( \frac{G_0}{G_{bn}} \right)$$

-> Si se cuenta con medidas de GHI, se caracterizan ciclos estacionales de TL usando medidas de cielo claro y minimizando error de MCC usando TL mensual como variable.

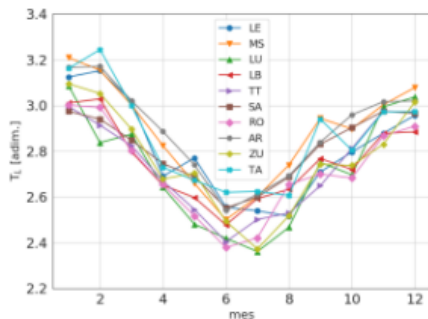
-en cada mes en cada locación:



-método validado usando diferentes modelos de referencia y método con medidas de DNI

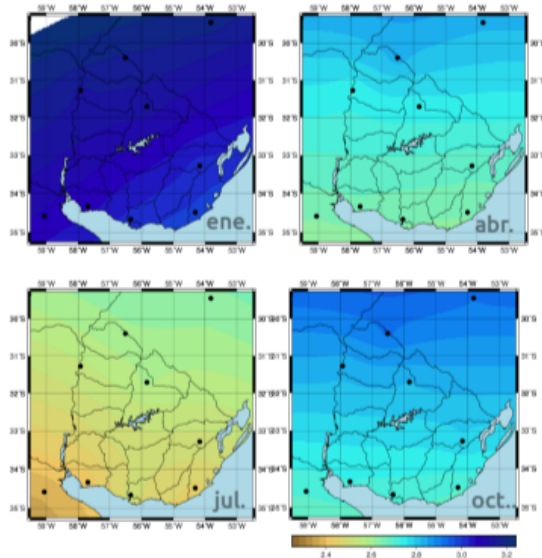
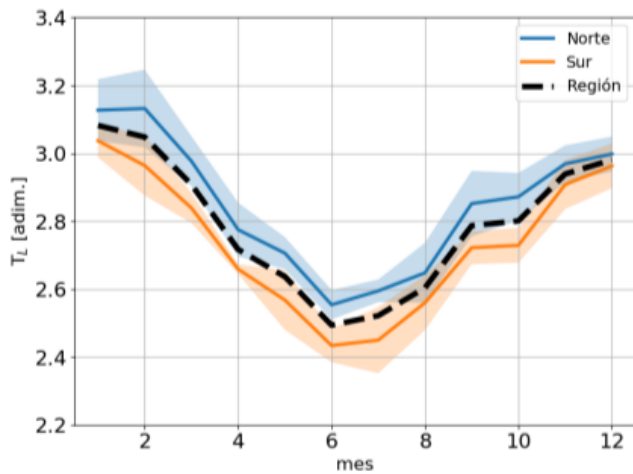
-> Hay relaciones empíricas para relacionar TL con otras variables atmosféricas

$$T_L = 1.8494 + 0.2425 w - 0.0203 w^2 + \beta(15.427 + 0.3153 w - 0.0254 w^2)$$



-ciclos no captan variabilidad diaria

## Turbidez de Linke - región



## ¿Cómo se evalúa la precisión de los modelos?

$Y$  -> serie temporal de referencia  
(medidas en general)

$$Y = (Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_n)$$

$\hat{Y}$  -> serie temporal a validar  
(estimada)

desvío medio

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

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

desvío absoluto  
medio

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

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

desvío cuadrático  
medio

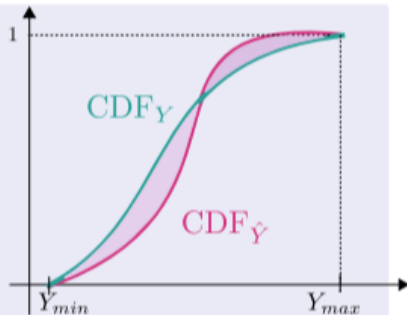
$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

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

Integral de Kolmogorov-Smirnov

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

cuantifica la similitud entre las  
distribuciones de probabilidad





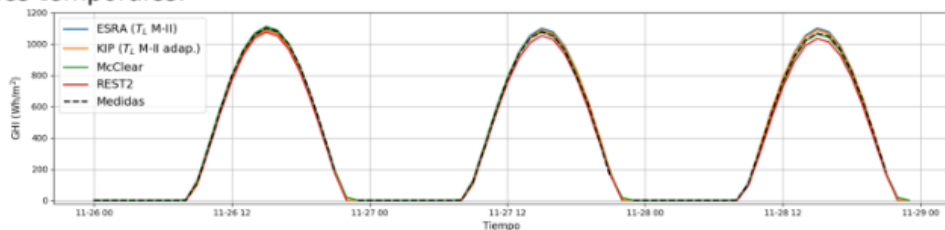
## Varios estudios de desempeño: variabilidad de resultados

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

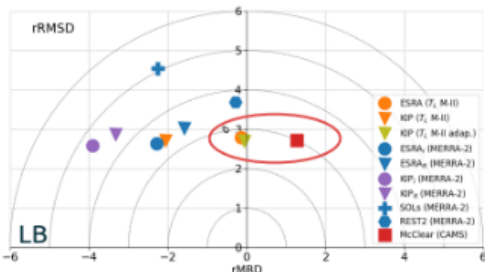
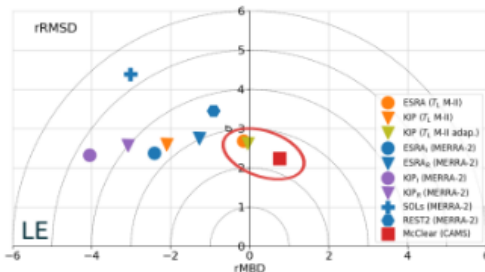
Código validación	métricas	ESRA		KIP		SOLs		REST-2		McClear	
		GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI	GHI	DNI
<b>G12</b>	rMBD(%)	+3.1	+3.8	-	-	-1.6	+0.8	-0.2	-0.3	-	-
	rRMSD(%)	4.5	5.6	-	-	2.8	2.6	1.5	1.4	-	-
<b>E15</b>	rMBD(%)	+4.6	-0.3	-2.0	-6.0	-2.2	-4.5	+0.3	-0.3	-	-
	rRMSD(%)	5.7	6.4	4.8	7.8	5.8	6.9	5.1	6.2	-	-
<b>I16</b>	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
<b>A19</b>	rMBD(%)	+0.77	+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

## Evaluación de desempeño en Uruguay: GHI

series temporales:



métricas:



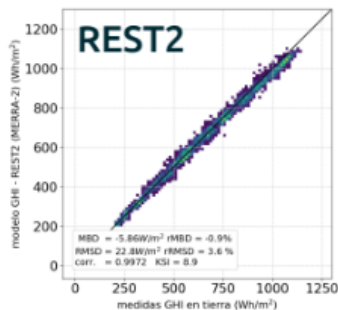
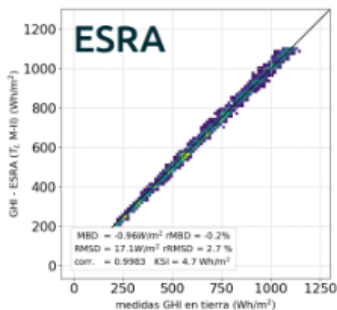
$$RMSD^2 = MBD^2 + \sigma^2$$

desviación estándar de los residuos

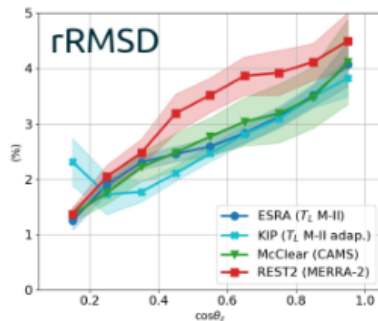
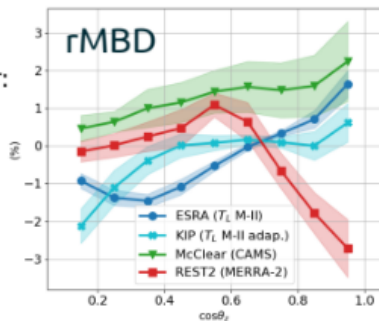
se logran  $|rMBD| < 1\%$  y  $rRMSD < 4\%$ , destacándose:  
 -ESRA y KIP basados en  $T_L$  (local o regional)  
 -McCclear (basado en CAMS) y REST2 (MERRA-2)

## Evaluación de desempeño en Uruguay: GHI

gráficas de dispersión:

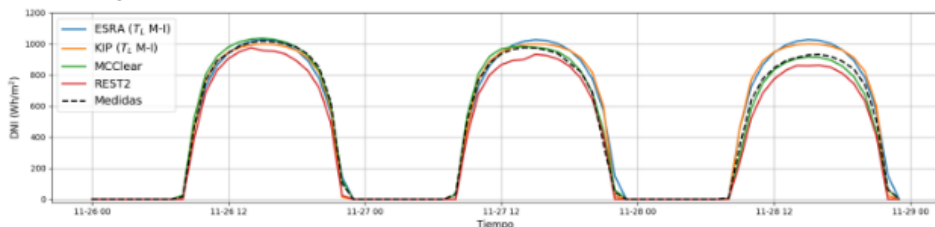


Métricas discriminadas por altura solar:

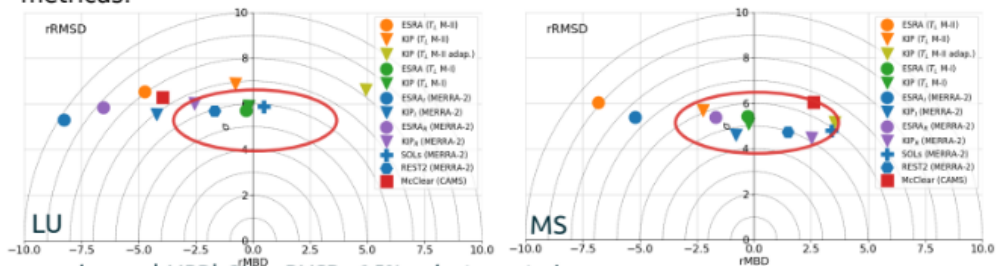


## Evaluación de desempeño en Uruguay: DNI

series temporales:



métricas:

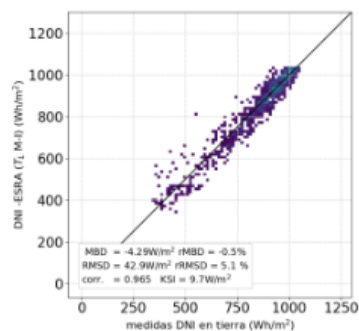
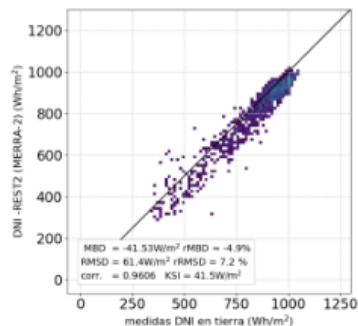


pocos alcanzan  $|rMBD| < 3\%$  y  $rRMSD < 6.5\%$  en las tres estaciones:

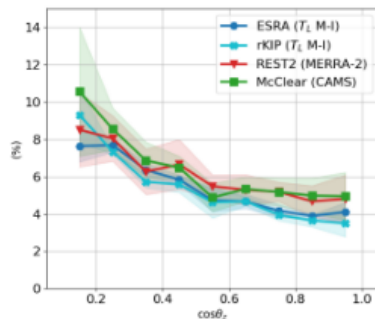
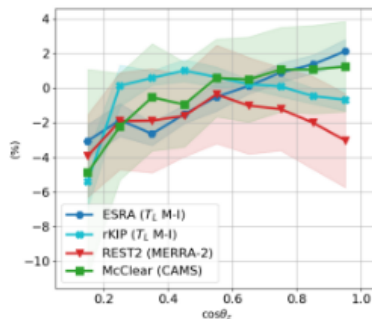
- modelos basados en ciclos de TL son precisos pero no extrapolables
- REST-2 (MERRA-2) y McCClear (CAMS) en promedio tienen la mejor precisión (captan variabilidad de la atmósfera)

## Evaluación de desempeño en Uruguay: DNI

gráficas  
de dispersión:



Métricas  
discriminadas  
por altura solar:



## Irradiación global (GHI):

Se alcanzan rendimientos de **rRMSD < 4%**, **|rMBD|<1%**.

Modelos simples basados en ciclos anuales de  $T_L$ , como **ESRA** o **KIP** alcanzan gran precisión, con incertidumbres similares a las de los instrumentos de medida para GHI (3-4%)

Ciclos regionales de turbidez regionales (Sur/Norte) son adecuados

## Irradiación directa (DNI):

Se alcanzan rendimientos de **rRMSD < 7%**, **|rMBD|<3%**.

Modelos basados en ciclos medios de info atmosférica no son en general adecuados.

DNI es muy susceptible a cambios en la atmósfera. Es conveniente usar información atmosférica intradiaria.

Se destacan **REST2** (con MERRA-2) y **McClear** (CAM5).

para usar un modelo es necesario conocer la disponibilidad y precisión de información atmosférica de entrada.

## PRÓXIMA CLASE ... MODELOS DE SEPARACIÓN DIRECTA - DIFUSA

Rodrigo Alonso-Suárez

r.alonso.suarez@gmail.com

<http://les.edu.uy/>



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA