



# Desempeño de estimaciones satelitales de GHI 10-minutales usando GOES-16: modelo LCIM

Agustín Laguarda,  
[agu.laguarda@gmail.com](mailto:agu.laguarda@gmail.com)

Área de modelado de la radiación por satélite.

Integrantes: A. Laguarda (R), R. Alonso-Suárez, L. Dovat, E. Marchesoni, A. Monetta.



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



**LES**  
LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR

# Breve descripción del modelo satelital



# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región\*
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)

$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

\* Laguarda, A. (2021). Tesis de Doctorado en Ingeniería de la Energía, FING, Universidad de la República.

# Descripción

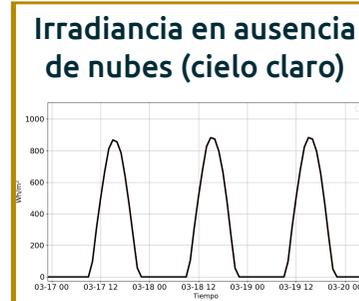
- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)



$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)

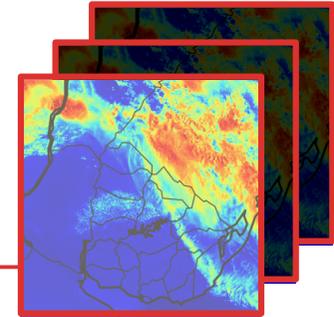
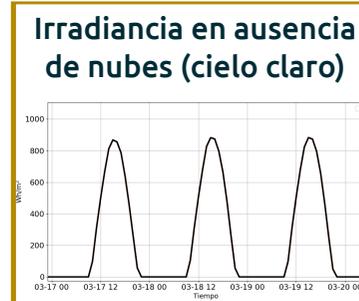


$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

Estimado por un modelo  
de cielo claro

# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)



Imágenes satelitales del canal visible GOES-East

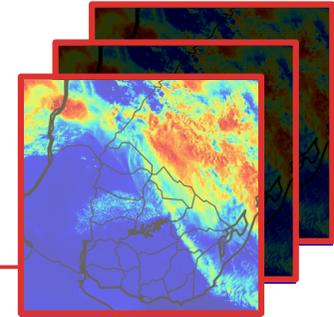
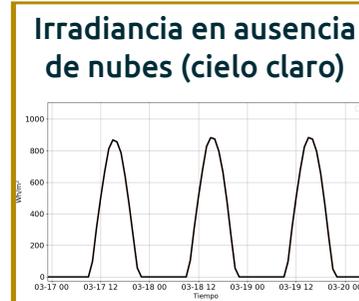
$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

Estimado por un modelo de cielo claro

Factor de atenuación por nubosidad (empírico)

# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)



Imágenes satelitales del canal visible GOES-East

$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

Estimado por un modelo de cielo claro

Factor de atenuación por nubosidad (empírico)

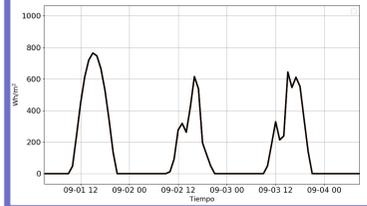
$\eta$

Índice de nubosidad adimensional, obtenido a partir de la reflectancia planetaria (satelital)

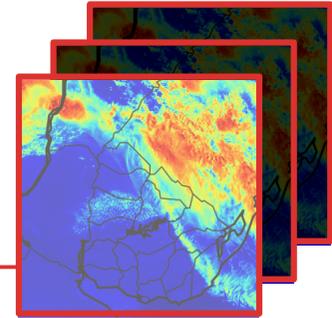
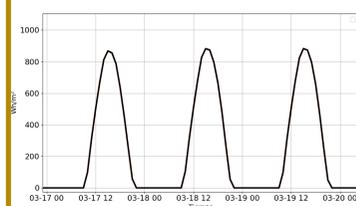
# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)

Estimativo de irradiación global horizontal



Irradiancia en ausencia de nubes (cielo claro)



Imágenes satelitales del canal visible GOES-East

$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

Estimado por un modelo de cielo claro

de las opciones estudiadas se destacan:  
ESRA,  
McClear (caja negra)  
REST2

Factor de atenuación por nubosidad (empírico)

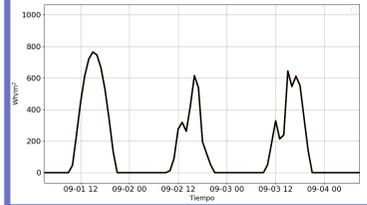
$$\eta$$

Índice de nubosidad adimensional, obtenido a partir de la reflectancia planetaria (satelital)

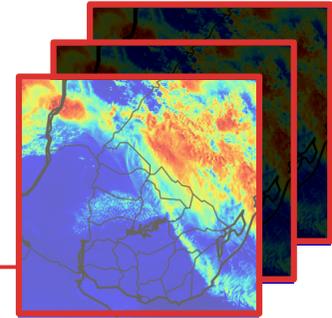
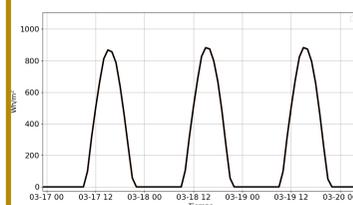
# Descripción

- modelo satelital de irradiación desarrollado por el LES con foco en la región
- usa un índice de nubosidad (CIM) y un modelo preciso de cielo claro
- denominación LCIM (LES Cloud Index Model)

Estimativo de irradiación global horizontal



Irradiancia en ausencia de nubes (cielo claro)



Imágenes satelitales del canal visible GOES-East

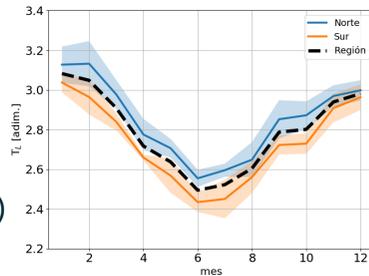
$$G = G_{cc} \times F(\eta)$$

Estimado por un modelo de cielo claro

Factor de atenuación por nubosidad (empírico)

## LCIM versión operacional

usa ESRA con medias regionales de ciclos anuales de Turbidez de Linke ( $T_L$ ) (obtenidos localmente)

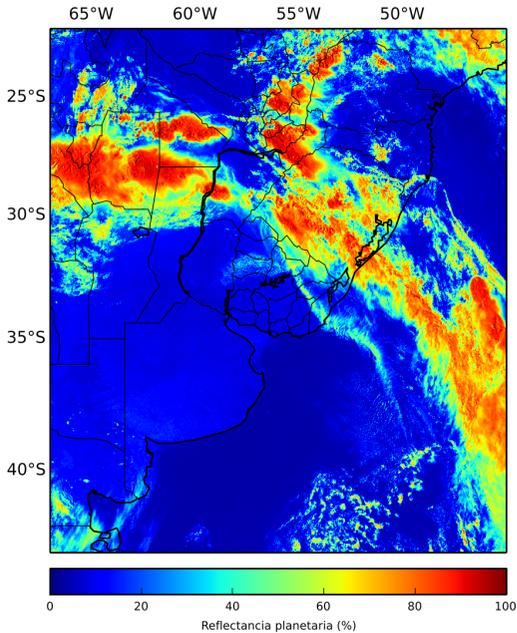


de las opciones estudiadas se destacan: ESRA, McClear (caja negra) REST2

$\eta$

Índice de nubosidad adimensional, obtenido a partir de la reflectancia planetaria (satelital)

# LCIM - información satelital

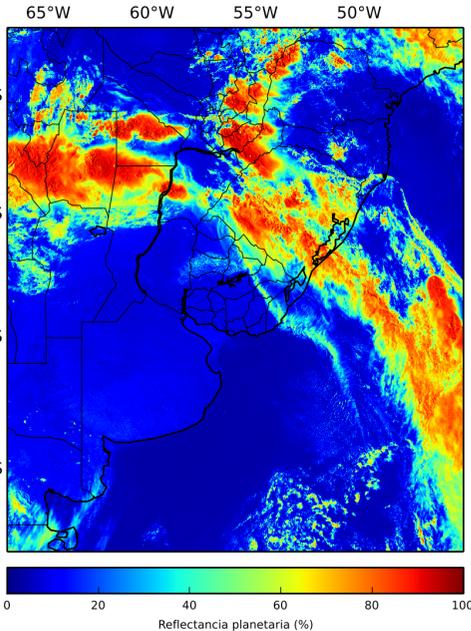
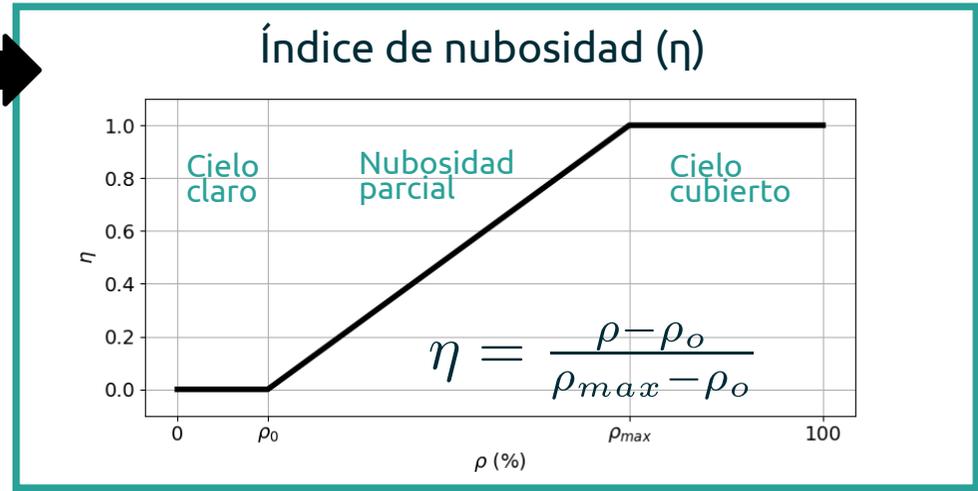


LES

CH1 RP 06-01-2018 12:38 UTC

$\rho$  es el albedo del sistema  
Tierra + atm. (adim.)

# LCIM - información satelital

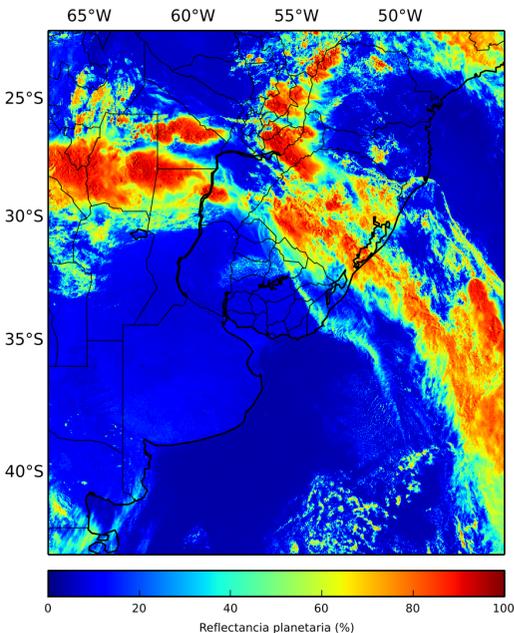


LES

CH1 RP 06-01-2018 12:38 UTC

$\rho$  es el albedo del sistema  
Tierra + atm. (adim.)

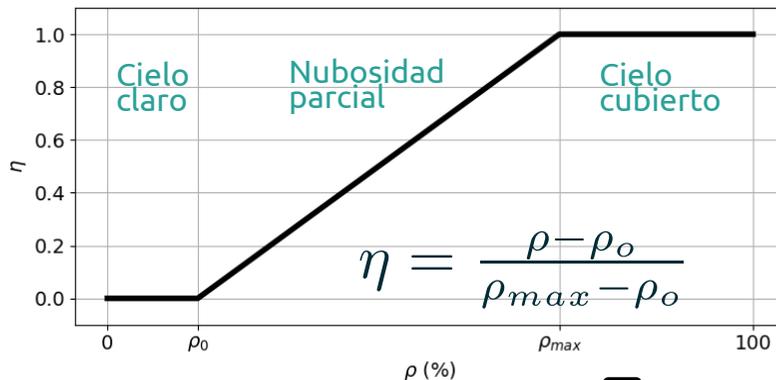
# LCIM - información satelital



LES CH1 RP 06-01-2018 12:38 UTC

$\rho$  es el albedo del sistema  
Tierra + atm. (adim.)

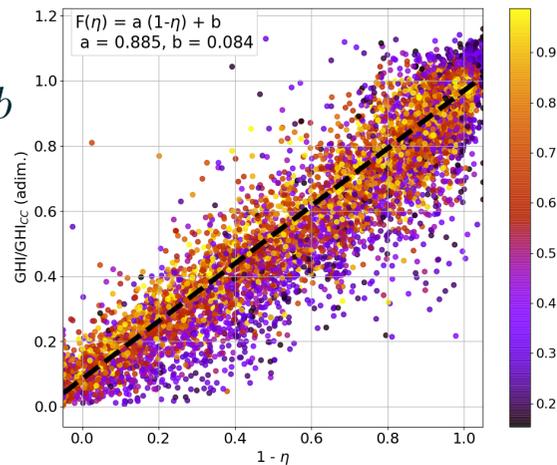
## Índice de nubosidad ( $\eta$ )



## Factor de atenuación (F) lineal con $1-\eta$ :

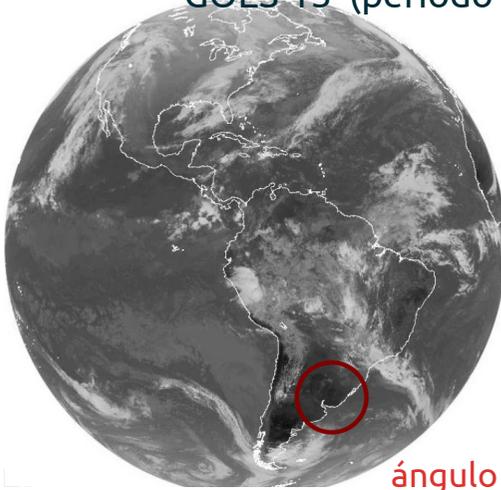
$$F(\eta) = a(1 - \eta) + b$$

a y b se ajustan a  
medidas en tierra



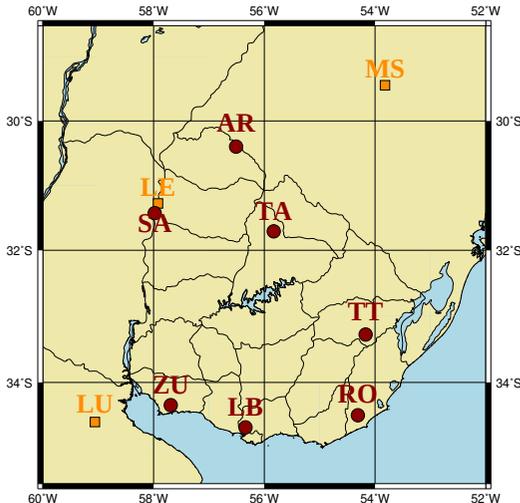
# Entrenamiento de parámetros a y b

GOES-13 (período 2010 - 2017)



- lon. 75°W
- resolución:
  - ~1km (nadir)
  - ~2km(región)
- frecuencia irregular
- ~ 2 imágenes/hora

ángulo de vista ~40°

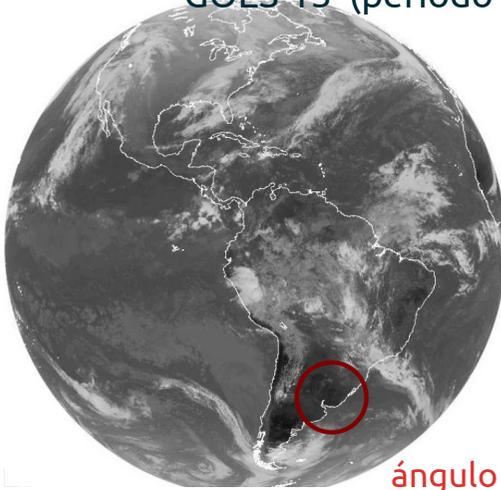


Medidas en tierra:

- acumulados horarios
- control de calidad:
  - BSRN, cotas extremas
  - de modelo CS,
  - inspección visual
- 5 años de datos por estación (promedio)

# Entrenamiento de parámetros a y b

GOES-13 (período 2010 - 2017)



- lon. 75°W
- resolución:
  - ~1km (nadir)
  - ~2km(región)
- frecuencia irregular
- ~ 2 imágenes/hora

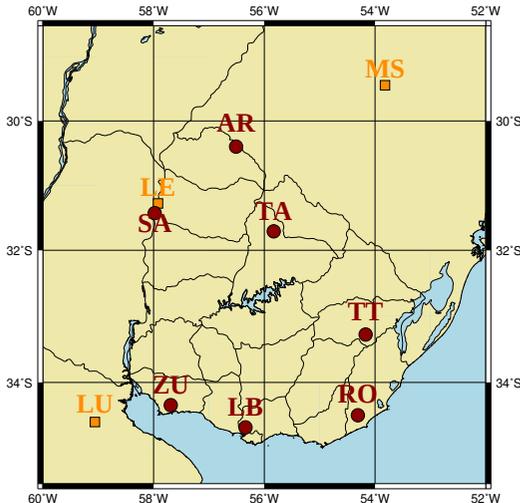
ángulo de vista ~40°

se obtienen a y b para cada sitio

	CIM-ESRA		
	Media	$\sigma$ (adim.)	$\sigma_{rel}$ (%)
<b>a</b>	0.876	0.009	1.0
<b>b</b>	0.088	0.006	6.8
	CIM-McClear		
	Media	$\sigma$ (adim.)	$\sigma_{rel}$ (%)
<b>a</b>	0.859	0.013	1.5
<b>b</b>	0.108	0.007	5.6

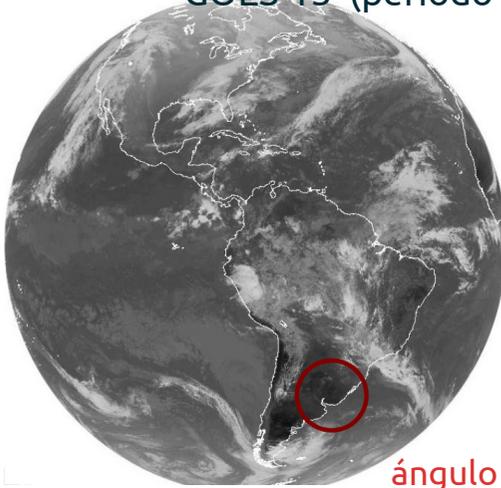
Medidas en tierra:

- acumulados horarios
- control de calidad:
  - BSRN, cotas extremas de modelo CS,
  - inspección visual
- 5 años de datos por estación (promedio)



# Entrenamiento de parámetros a y b

GOES-13 (período 2010 - 2017)



- lon. 75°W
- resolución:
  - ~1km (nadir)
  - ~2km(región)
- frecuencia irregular
- ~ 2 imágenes/hora

ángulo de vista ~40°

se obtienen a y b para cada sitio

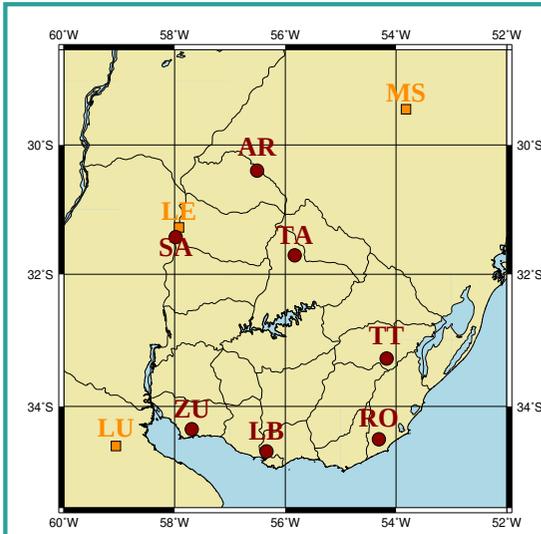
	CIM-ESRA		
	Media	$\sigma$ (adim.)	$\sigma_{rel}$ (%)
a	0.876	0.009	1.0
b	0.088	0.006	6.8
	CIM-McClear		
	Media	$\sigma$ (adim.)	$\sigma_{rel}$ (%)
a	0.859	0.013	1.5
b	0.108	0.007	5.6

Medidas en tierra:

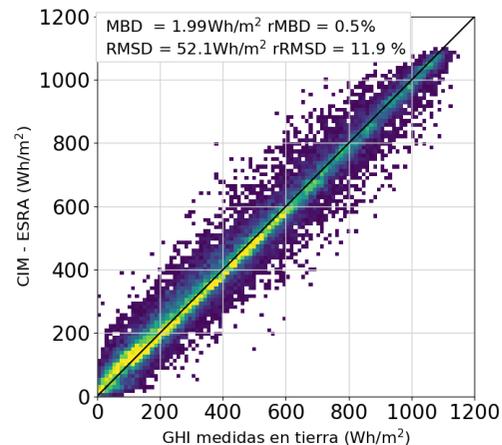
- acumulados horarios
- control de calidad:
  - BSRN, cotas extremas de modelo CS,
  - inspección visual
- 5 años de datos por estación (promedio)



gran homogeneidad  
espacial de parámetros  
empíricos



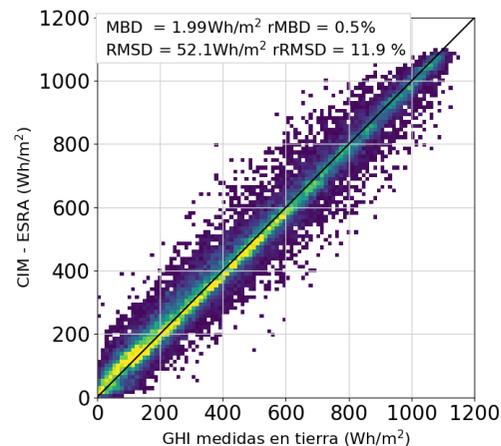
# Desempeño LCIM a nivel horario



	CIM-ESRA			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.5</b>	+0.4	+0.6	0.1
rRMSD (%)	<b>12.1</b>	11.1	14.0	0.9
KSI (Wh/m <sup>2</sup> )	<b>7.9</b>	7.1	8.8	0.6
CIM-McClear				
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.7</b>	+0.6	+0.9	0.1
rRMSD (%)	<b>11.8</b>	10.8	13.7	0.9
KSI (Wh/m <sup>2</sup> )	<b>8.9</b>	7.4	10.3	0.9

media ~439 Wh/m<sup>2</sup>

# Desempeño LCIM a nivel horario

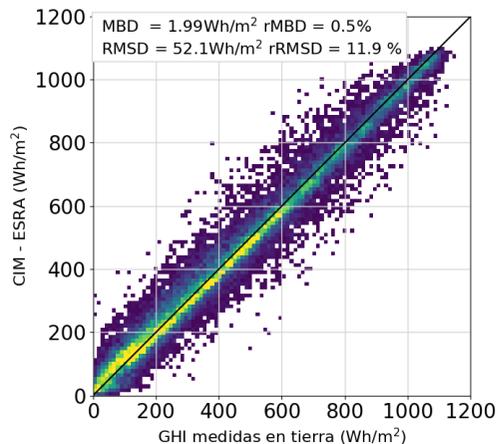


	CIM-ESRA			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.5</b>	+0.4	+0.6	0.1
rRMSD (%)	<b>12.1</b>	11.1	14.0	0.9
KSI (Wh/m <sup>2</sup> )	<b>7.9</b>	7.1	8.8	0.6
CIM-McClear				
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.7</b>	+0.6	+0.9	0.1
rRMSD (%)	<b>11.8</b>	10.8	13.7	0.9
KSI (Wh/m <sup>2</sup> )	<b>8.9</b>	7.4	10.3	0.9

media ~439 Wh/m<sup>2</sup>

desempeño  
estable con  
rRMSD ~12%  
|rMBD| < 1%

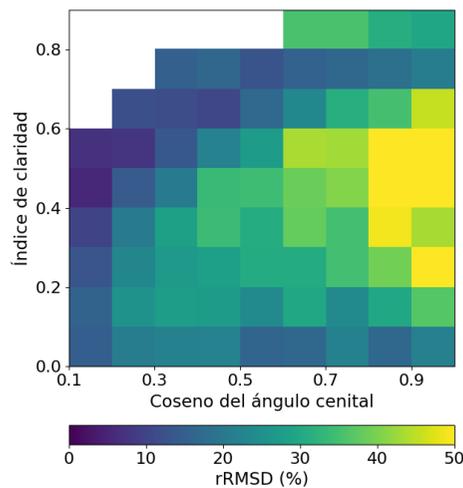
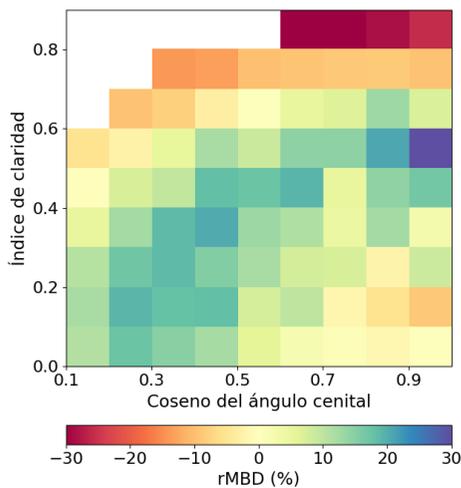
# Desempeño LCIM a nivel horario



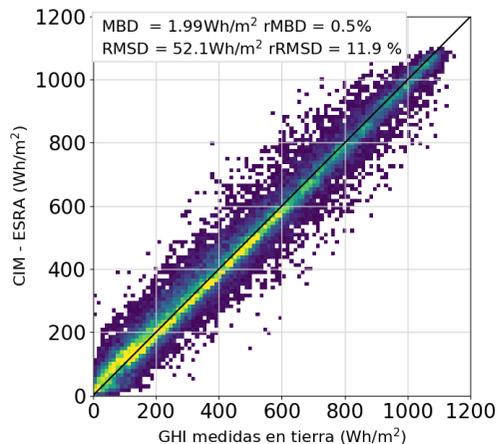
	CIM-ESRA			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.5</b>	+0.4	+0.6	0.1
rRMSD (%)	<b>12.1</b>	11.1	14.0	0.9
KSI ( $\text{Wh/m}^2$ )	<b>7.9</b>	7.1	8.8	0.6
	CIM-McClear			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	<b>+0.7</b>	+0.6	+0.9	0.1
rRMSD (%)	<b>11.8</b>	10.8	13.7	0.9
KSI ( $\text{Wh/m}^2$ )	<b>8.9</b>	7.4	10.3	0.9

media  $\sim 439 \text{ Wh/m}^2$

desempeño estable con  $rRMSD \sim 12\%$   $|rMBD| < 1\%$



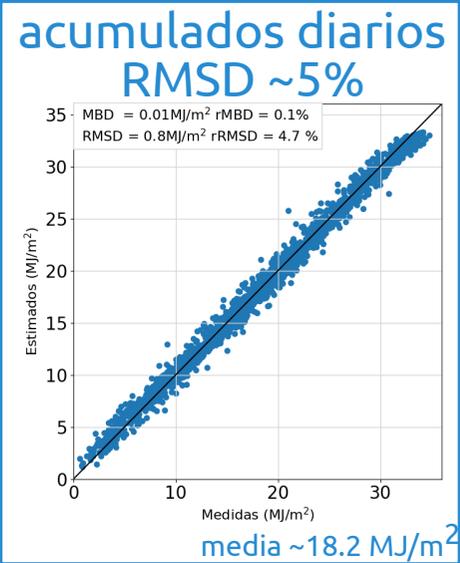
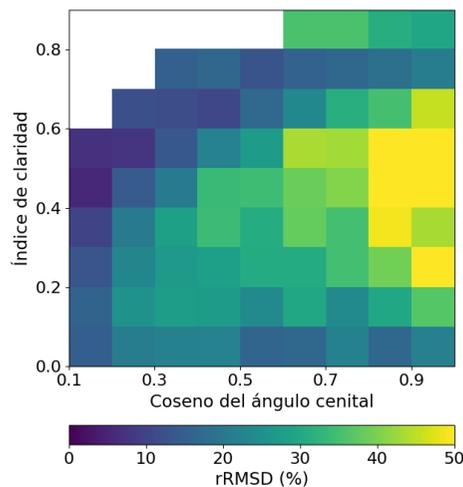
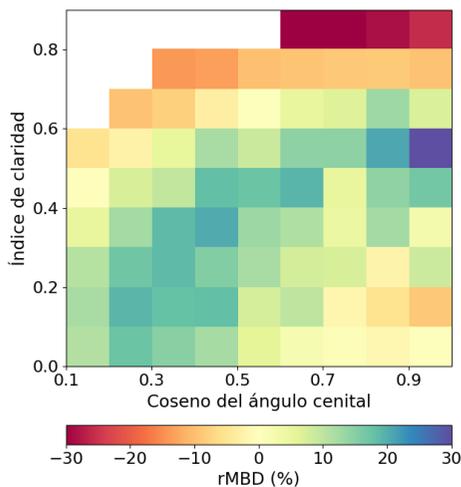
# Desempeño LCIM a nivel horario



	CIM-ESRA			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	+0.5	+0.4	+0.6	0.1
rRMSD (%)	12.1	11.1	14.0	0.9
KSI ( $\text{Wh/m}^2$ )	7.9	7.1	8.8	0.6
	CIM-McClear			
	Media	Min.	Máx.	$\sigma$
rMBD (%)	+0.7	+0.6	+0.9	0.1
rRMSD (%)	11.8	10.8	13.7	0.9
KSI ( $\text{Wh/m}^2$ )	8.9	7.4	10.3	0.9

media  $\sim 439 \text{ Wh/m}^2$

desempeño estable con  $rRMSD \sim 12\%$   $|rMBD| < 1\%$



# Proyección del modelo satelital

**GOES-16** comienza a operar  
a comienzos de 2018 (GOES-East)

frecuencia regular 10-minutal  
3 veces más canales espectrales  
resolución espacial 4 veces mayor

# Proyección del modelo satelital

**GOES-16** comienza a operar  
a comienzos de 2018 (GOES-East)

frecuencia regular 10-minutal  
3 veces más canales espectrales  
resolución espacial 4 veces mayor

1 hora  resolución temporal 10 minutos

# Proyección del modelo satelital

**GOES-16** comienza a operar  
a comienzos de 2018 (GOES-East)

frecuencia regular 10-minutal  
3 veces más canales espectrales  
resolución espacial 4 veces mayor

1 hora  10 minutos

resolución temporal

**LCIM**

robustez de parámetros empíricos en la región (a y b)  
estabilidad espacial del desempeño

# Proyección del modelo satelital

**GOES-16** comienza a operar  
a comienzos de 2018 (GOES-East)

frecuencia regular 10-minutal  
3 veces más canales espectrales  
resolución espacial 4 veces mayor

1 hora  10 minutos  
resolución temporal

**LCIM**

robustez de parámetros empíricos en la región (a y b)  
estabilidad espacial del desempeño

región  Pampa Húmeda  
cobertura espacial

# Proyección del modelo satelital

**GOES-16** comienza a operar  
a comienzos de 2018 (GOES-East)

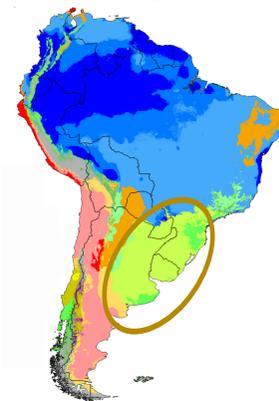
frecuencia regular 10-minutal  
3 veces más canales espectrales  
resolución espacial 4 veces mayor

1 hora  $\xrightarrow{\text{resolución temporal}}$  10 minutos

**LCIM**

robustez de parámetros empíricos en la región (a y b)  
estabilidad espacial del desempeño

región  $\xrightarrow{\text{cobertura espacial}}$  Pampa Húmeda  
(y más??)



Clasificación climática  
Köppen-Geiger  
principalmente  
Cfa y Cfb

# 1<sup>ra</sup> Validación 10-minutal\*



\*Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. A. Laguarda, P. Iturbide, X. Orsi, M.J. Denegri, S. Luza, L. Burgos, V. Stern y R. Alonso-Suárez. Aceptado para su publicación en la revista ERMA en 2021.

# 1<sup>ra</sup> Validación 10-minutal\*

- en sitios no utilizados para el entrenamiento y diferente período de tiempo
- se incluye validación de modelo físico de CAMS (Heliosat-4) como referencia

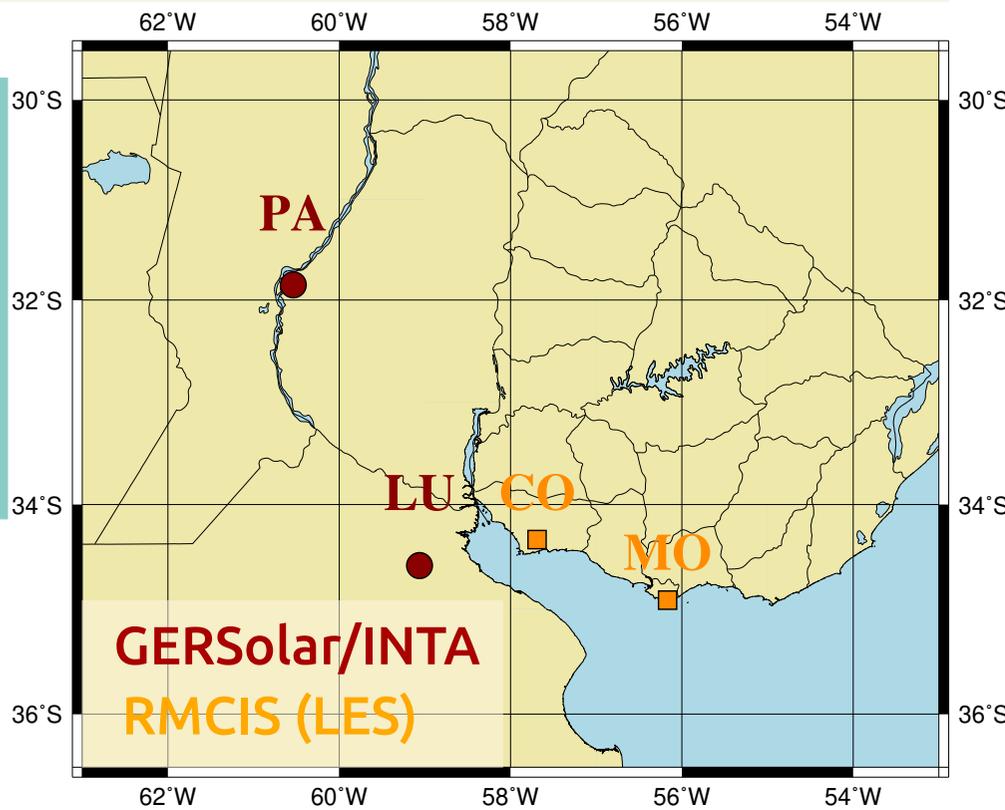
\*Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. A. Laguarda, P. Iturbide, X. Orsi, M.J. Denegri, S. Luza, L. Burgos, V. Stern y R. Alonso-Suárez. Aceptado para su publicación en la revista ERMA en 2021.

# Mediciones en tierra de referencia

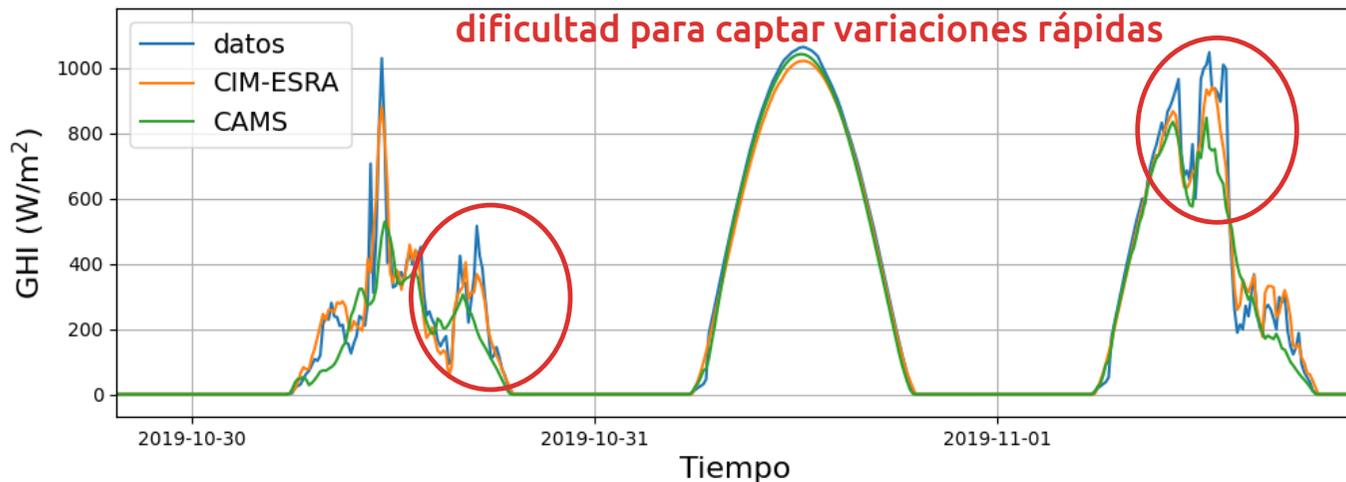
Estación	alt. (m)	equipo	#datos selecc.	Período
LU Luján	29	K&Z CMP21/11	58204	2018 - 2020
PA Paraná	105	K&Z CMP11	69258	
CO Colonia	70	K&Z CMP6	65911	
MO Montevideo	58	K&Z CMP6	66564	

- registran GHI a cada minuto
- se usan promedios 10 minutales (criterio 2/3)
- filtros de calidad:  
BSRN, cotas extremas de modelo CS, inspección visual
- alturas solares  $> 7^\circ$

PA y MO no considerados anteriormente para entrenamiento de parámetros de LCIM



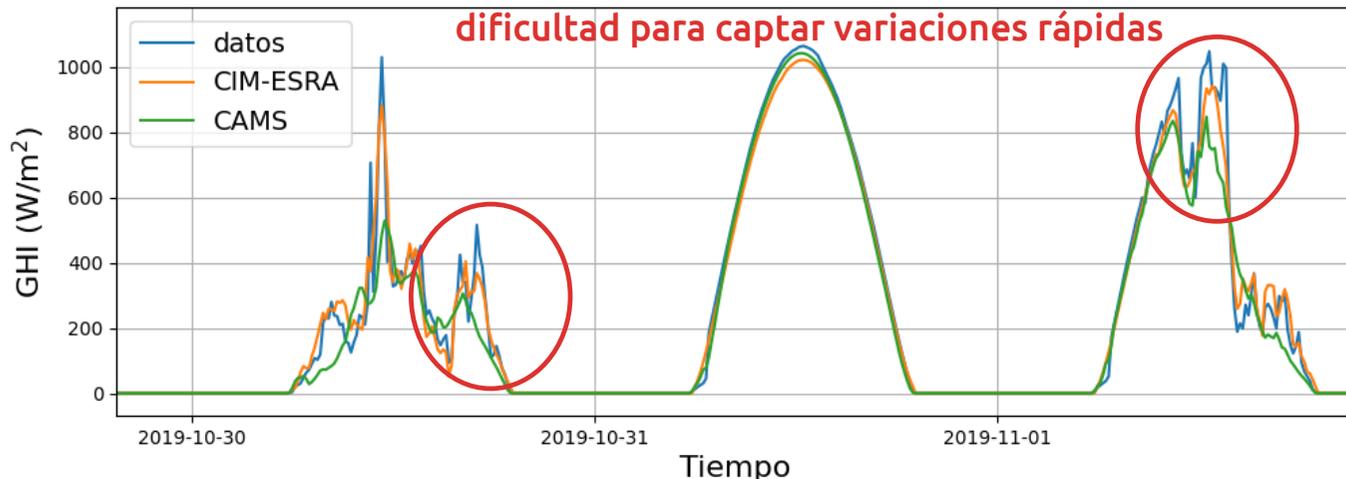
# Validación



**GHI para toda condición de cielo (2018-2020)**

Métricas	Luján		Paraná		Colonia		Montevideo	
	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA
R	0,953	0,970	0,946	0,969	0,959	0,973	0,957	0,976
rMBD (%)	-1,4	+1,7	-2,0	+2,2	-2,4	+0,7	-5,0	+1,2
rRMSD (%)	20,8	16,7	21,9	16,5	19,6	15,8	21,0	15,6
GHI media (W/m <sup>2</sup> )	442,1		449,7		445,9		437,4	

# Validación



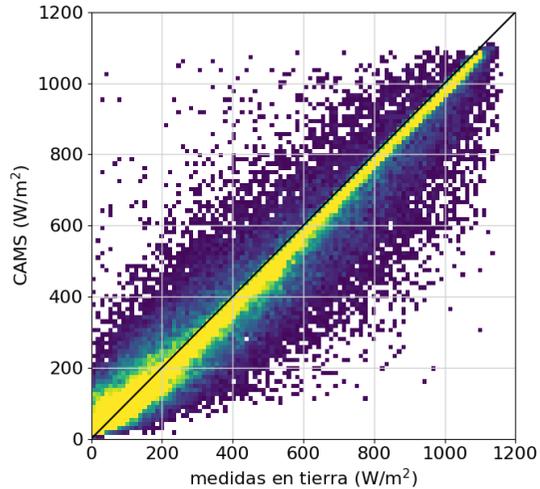
GHI para toda condición de cielo (2018-2020)								
Métricas	Luján		Paraná		Colonia		Montevideo	
	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA	Heliosat-4	CIM-ESRA
R	0,953	0,970	0,946	0,969	0,959	0,973	0,957	0,976
rMBD (%)	-1,4	+1,7	-2,0	+2,2	-2,4	+0,7	-5,0	+1,2
rRMSD (%)	20,8	16,7	21,9	16,5	19,6	15,8	21,0	15,6
GHI media (W/m²)	442,1		449,7		445,9		437,4	

- correlaciones >0.94 en todos los casos
- Heliosat-4 subestima
- LCIM sobreestima
- LCIM tiene rRMSD 5% menores

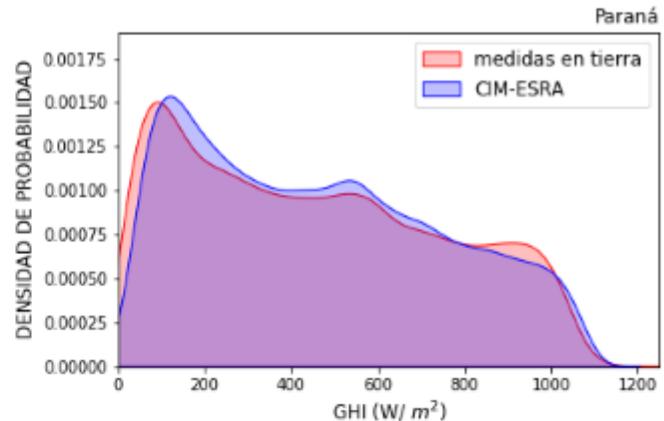
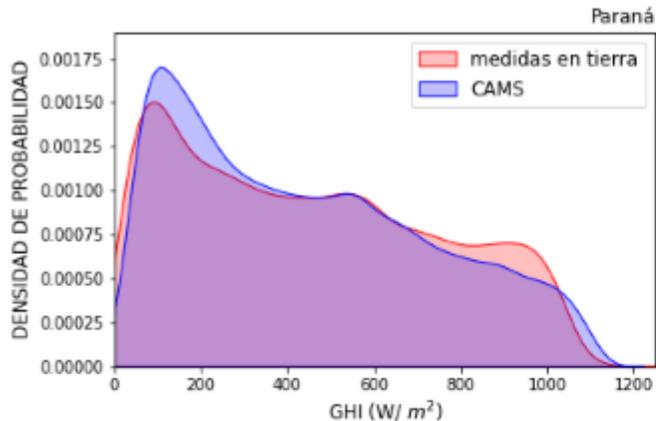
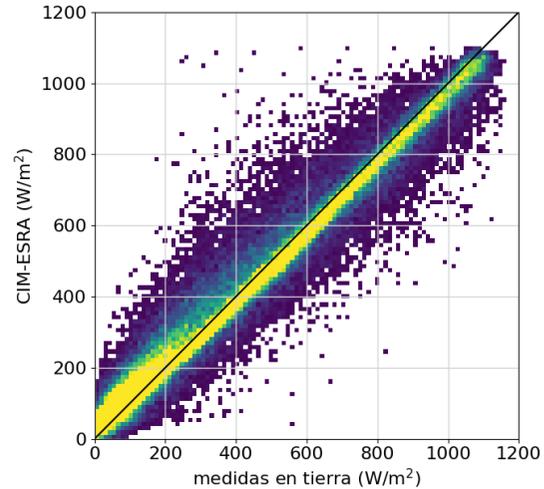
desempeño estable con  
**rRMSD ~16% |rMBD| < 2.2%**

# Validación

## Heliosat-4

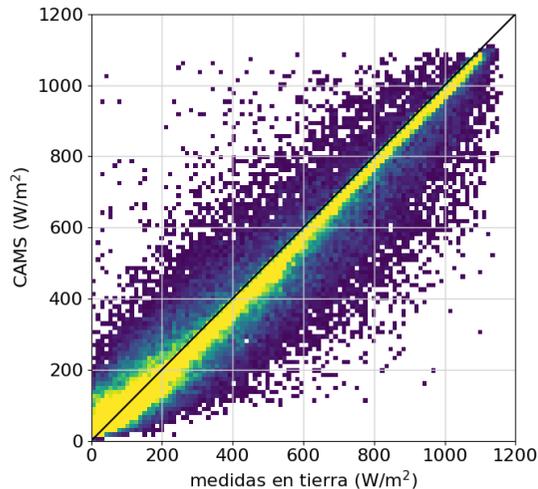


## LCIM

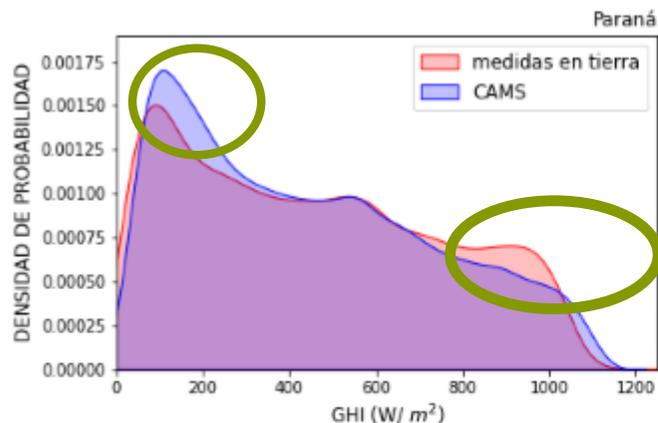
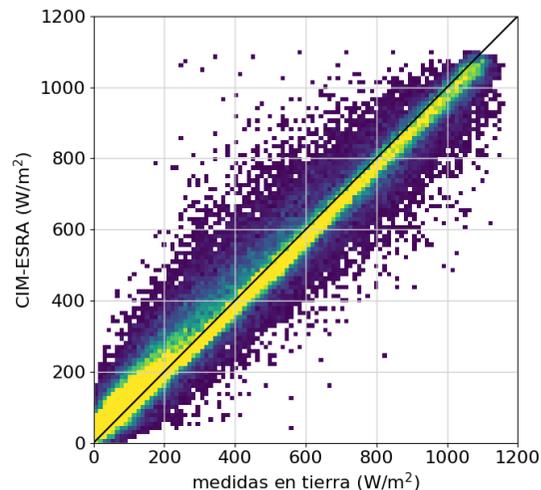


# Validación

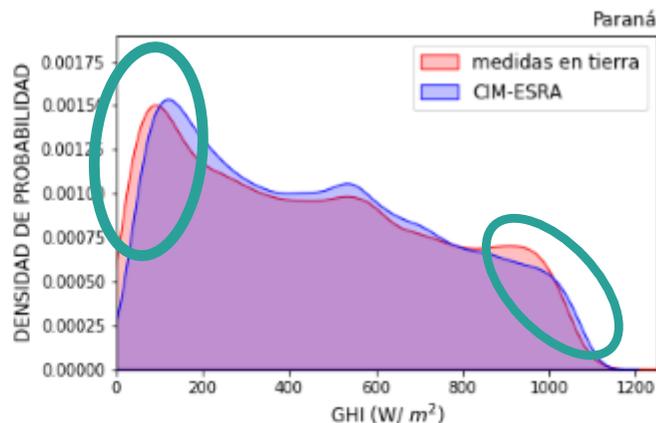
## Heliosat-4



## LCIM



mayor ocurrencia de irrad. bajas  
menor ocurrencia de irrad. altas



baja ocurrencia de valores  
extremos

# Conclusiones



# Conclusiones

- se valida LCIM a nivel 10 minutil (basado en ESRA y ciclos anuales de turbidez) en 4 nuevos sitios de la Pampa Húmeda y se compara con Heliosat-4.
- se verifica buen desempeño e indicadores con homogeneidad territorial.  
Heliosat-4:  $r\text{MBD}$  -2 %,  $r\text{RMSD}$  21% y LCIM:  $r\text{MBD}$  +1 %,  $r\text{RMSD}$  16%
- Dificultad de ambos modelos en captar variaciones rápidas de irradiancia ( $r\text{RMSD}$  pasan de 12% a nivel horario a 16% 10-minutil)
- LCIM (basado en GOES-16) es más preciso para la región que Heliosat-4 (MSG). Incluso en estaciones no consideradas para su entrenamiento



# Conclusiones

-se valida LCIM a nivel 10 minutal (basado en ESRA y ciclos anuales de turbidez) en 4 nuevos sitios de la Pampa Húmeda y se compara con Heliosat-4.

-se verifica buen desempeño e indicadores con homogeneidad territorial.  
Heliosat-4:  $r\text{MBD}$  -2 %,  $r\text{RMSD}$  21% y LCIM:  $r\text{MBD}$  +1 %,  $r\text{RMSD}$  16%

-Dificultad de ambos modelos en captar variaciones rápidas de irradiancia ( $r\text{RMSD}$  pasan de 12% a nivel horario a 16% 10-minutal)

-LCIM (basado en GOES-16) es más preciso para la región que Heliosat-4 (MSG). Incluso en estaciones no consideradas para su entrenamiento

mejor desempeño de LCIM puede deberse a dos factores:

- i) al ser semi-empírico, tiene parámetros ajustados a la región, aunque sea utilizando información de 10 sitios en el período 2010-2017
- ii) se basa en información del satélite GOES-East, con mejor vista de la región que Heliosat-4, MSG ( $\sim 70^\circ$ )

# Conclusiones

- se valida LCIM a nivel 10 minutal (basado en ESRA y ciclos anuales de turbidez) en 4 nuevos sitios de la Pampa Húmeda y se compara con Heliosat-4.
- se verifica buen desempeño e indicadores con homogeneidad territorial. Heliosat-4:  $r\text{MBD}$  -2 %,  $r\text{RMSD}$  21% y LCIM:  $r\text{MBD}$  +1 %,  $r\text{RMSD}$  16%
- Dificultad de ambos modelos en captar variaciones rápidas de irradiancia ( $r\text{RMSD}$  pasan de 12% a nivel horario a 16% 10-minutal)
- LCIM (basado en GOES-16) es más preciso para la región que Heliosat-4 (MSG). Incluso en estaciones no consideradas para su entrenamiento

mejor desempeño de LCIM puede deberse a dos factores:

- i) al ser semi-empírico, tiene parámetros ajustados a la región, aunque sea utilizando información de 10 sitios en el período 2010-2017
- ii) se basa en información del satélite GOES-East, con mejor vista de la región que Heliosat-4, MSG ( $\sim 70^\circ$ )

resultados continúan sugiriendo que LCIM con parámetros promediados tiene alta extrapolabilidad espacial, al menos en la región climática afín de la Pampa Húmeda.

# Aspectos en desarrollo



# Aspectos en desarrollo

## **modelado de cielo claro:**

- captar heterogeneidad local de la atmósfera sin nubes
  - > uso de modelos más detallados (McClear, REST-2)  
e información atmosférica disponible como MERRA-2  
en vez de ciclos estacionales

# Aspectos en desarrollo

## **modelado de cielo claro:**

- captar heterogeneidad local de la atmósfera sin nubes
  - > uso de modelos más detallados (McClear, REST-2)  
e información atmosférica disponible como MERRA-2  
en vez de ciclos estacionales

## **mejoras al tratamiento de nubes:**

- caracterización del brillo de fondo (canal visible)
- uso de otros canales espectrales

# Aspectos en desarrollo

## **modelado de cielo claro:**

- captar heterogeneidad local de la atmósfera sin nubes
  - > uso de modelos más detallados (McClear, REST-2)  
e información atmosférica disponible como MERRA-2  
en vez de ciclos estacionales

## **mejoras al tratamiento de nubes:**

- caracterización del brillo de fondo (canal visible)
- uso de otros canales espectrales

## **Además :**

- estimar radiación en bandas relevantes: UV, PAR

# Estimativos de GHI disponibles en sitio web

sitio y productos en desarrollo...



les.edu.uy/online/stack-loc/ 80%

Histórico de GHI en localidades pre-configuradas LES

Consulta

Localidad  
/Seleccionar estación/

Mes  
/Seleccionar mes/

Año  
/Seleccionar año/

Enviar Borrar

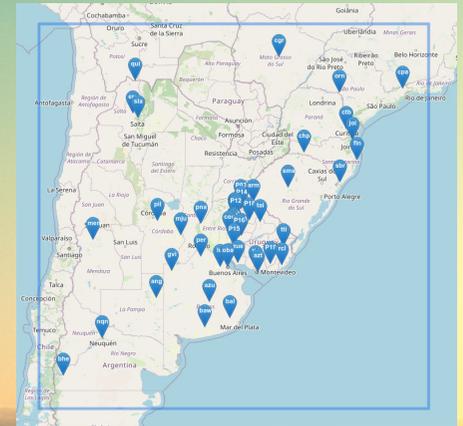
- acceso libre: <http://les.edu.uy/online/stack-loc/>  
(sobre 60 sitios pre-configurados, portal en construcción para la generación automática en sitios arbitrarios)

-disponibilidad 2018-hoy  
-archivos mensuales

Versión actual LCIM:

- parámetros a y b constantes
- basado en ESRA con ciclos  $T_L$  regionales
- rango dinámico específico para cada sitio

- 19 emplazamientos de plantas fotovoltaicas en el país
- sitios SONDA, SMN, de GERSolar, INENCO.
- varios sitios fuera de la Pampa Húmeda (desempeño sin validar)
- actualmente estudiando el rendimiento en Salta





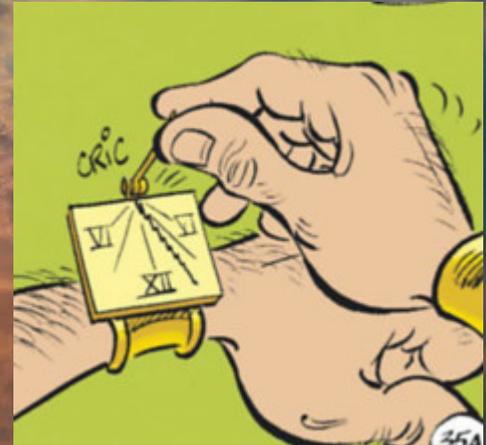
**LES**  
LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

**¡Gracias por la atención!**

**hora de preguntas...**



**Agustín Laguarda**

[agu.laguarda@gmail.com](mailto:agu.laguarda@gmail.com)

# Heliosat-4\*

- modelo satelital desarrollado por el Copernicus Atmosphere Meteorological Service (CAMS)
- combina dos submodelos, McClear y McCloud, para estimar GHI y DNI
- ambos utilizan ábacos o Look Up Tables (LUT) para casos preconfigurados  
+ funciones de interpolación (operacional).
- LUT se obtienen con las salidas de LIBRADTRAN, modelo de transferencia radiativa (RTM)

	modelo de cielo claro:		efecto de nubosidad:
<b>Heliosat-4 =</b>	<b>McCclear</b>	<b>+</b>	<b>McCloud</b>
<b>Variables de entrada:</b>	-Estado de la atmósfera: AOD <sub>550</sub> , vapor de agua, exponente Angström, ozono		-Propiedades de nubes: profundidad óptica, tipo de nubes, cobertura -Albedo terrestre
<b>Fuente:</b>	-reanálisis de CAMS (freq. tri-horario)		-canales visibles e infrarrojos de MSG (freq. 15-minutal) -MODIS (freq. diario)

\*Qu, Z. et al.(2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. Meteorologische Zeitschrift, 26(1):33–57