Utilización de información satelital para la estimación de irradiación solar en Uruguay

R. Alonso Suárez, G. Abal, D. Aicardi, R. Siri, P. Musé

Laboratorio de Energía Solar (LES)
Departamento de Física, CENUR Noroeste/UdelaR

29 de Octubre de 2014

r.alonso.suarez@gmail.com

Primera Jornada de Geofísica de Uruguay

1 Introducción
- Contexto general
- Imágenes de Satélite

2 Estimación del recurso solar por satélite
- Modelo utilizado
- Resultados

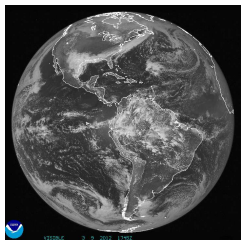
3 Conclusiones
- Comentarios finales

Contexto general

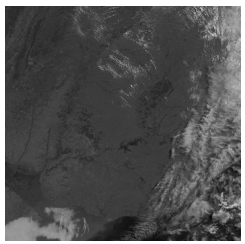
Objetivo inicial: año 2010.

Usar información satelital para estimar el recurso solar en todo el territorio nacional.

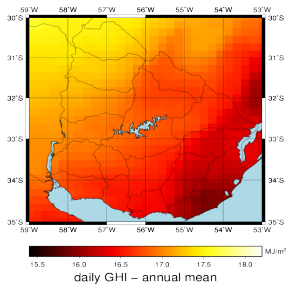
- **2011**
  Primer modelo de estimación del recurso solar en base a imágenes del satélite GOES-East.



- **2012–2013**
  Se mejoran modelos satelitales.
  Dos versiones con cambios metodológicos.

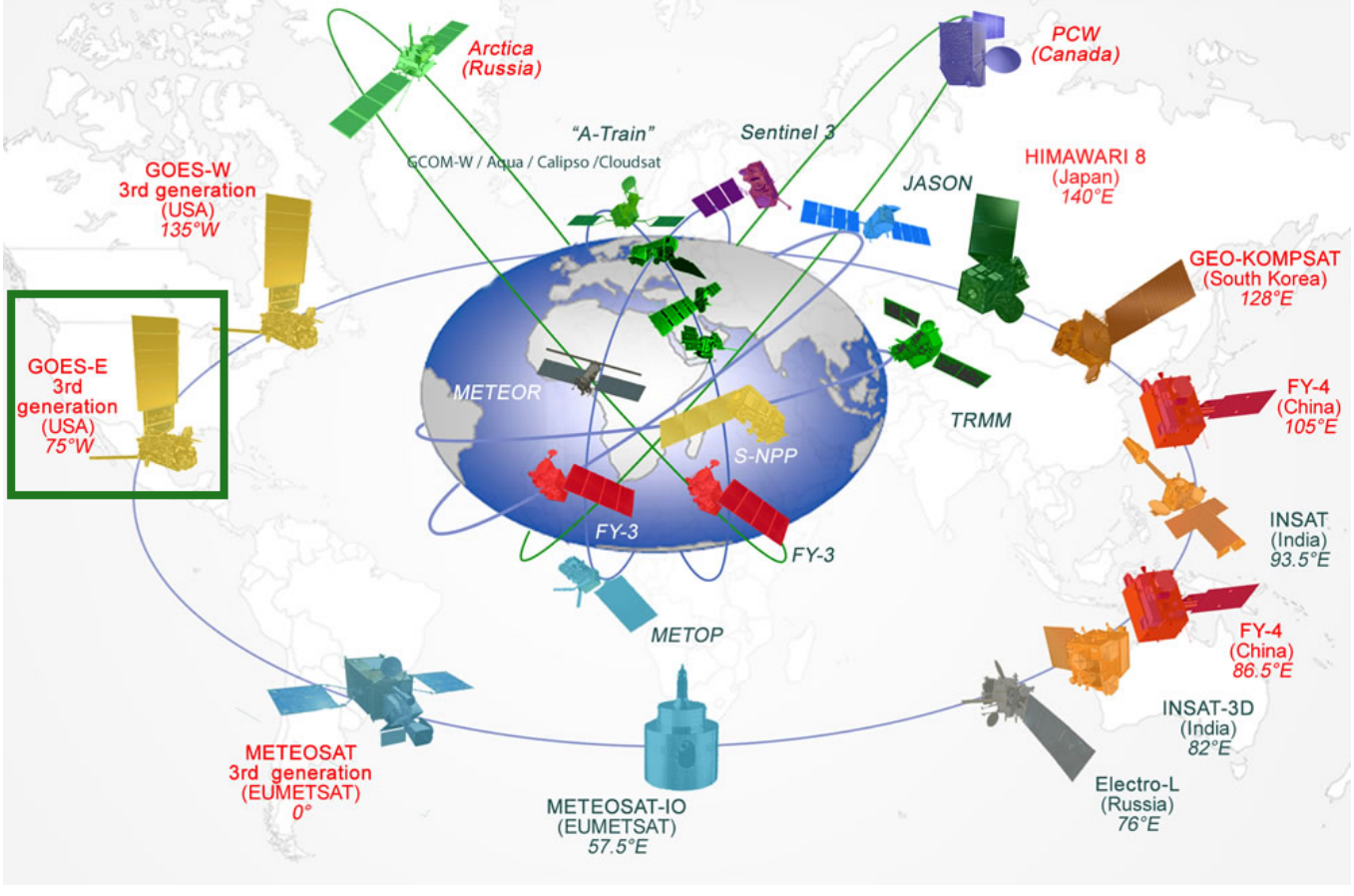


- **2014**
  Segunda versión del Mapa Solar.
  Antecedente: Primera versión (2009).



Imágenes de satélite (1)

Satélite: GOES-East. Operado por NOAA/USA.



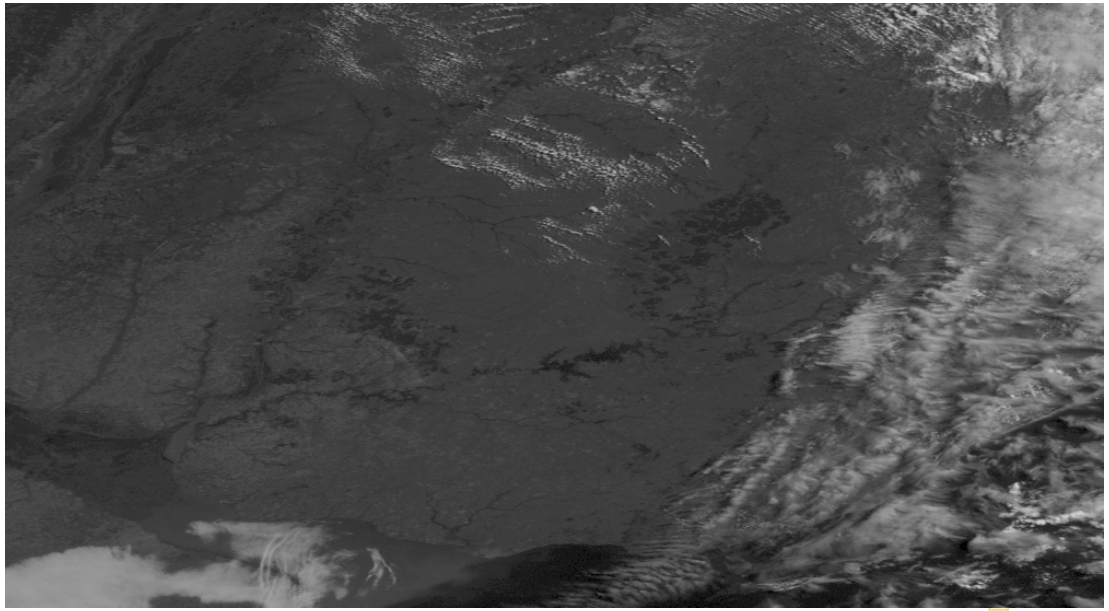
- Satélite geoestacionario (órbita alta).
- "Alta" cadencia temporal, "baja" resolución espacial.

Imágenes de satélite (2)

Base de imágenes local: casi 15 años de imágenes.

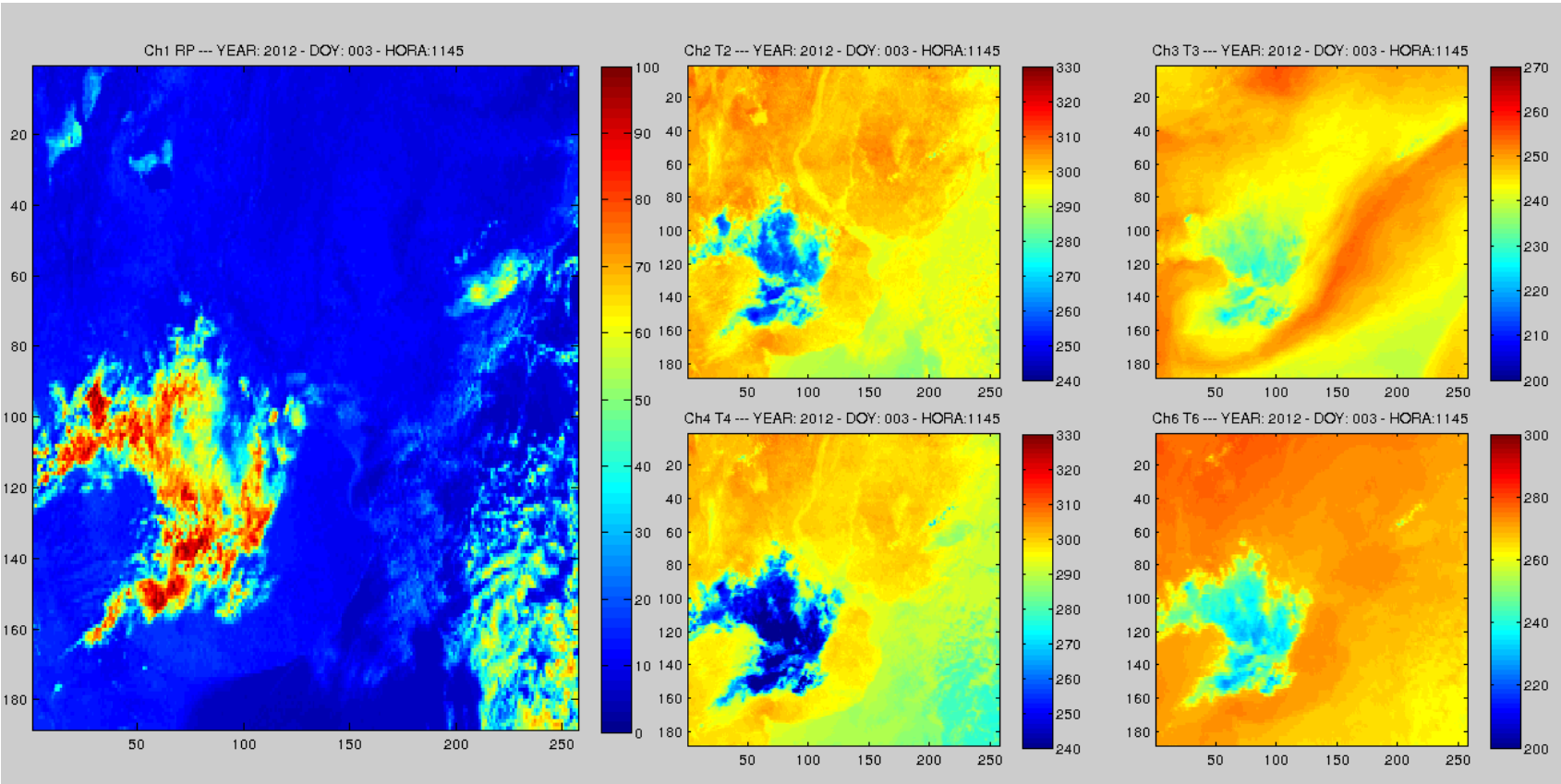
- Resolución temporal: 2 imágenes por hora (depende de schedule).
- Resolución espacial: aproximadamente 1.5 km (variable).

satélite	inicio	fin	imágenes
GOES 8	01/01/2000	31/03/2003	123800
GOES 12	01/04/2003	14/04/2010	259500
GOES 13	14/04/2010	31/08/2014	201200
total	01/01/2000	31/08/2014	**593500**



Imágenes de satélite (3)

- 5 bandas espectrales: visible + 4 canales infrarrojos.
- 2010 en adelante: ventana espacial extendida.
- Imágenes diurnas y nocturnas.



Imágenes de satélite (4)

La información se recibe en formato crudo (brillo raw, nivel 0)

Procesamiento actual: productos nivel 0

- Pasaje de proyección satélite a proyección regular $\sim$ 2 km.
- Calibración pre-launch y post-launch del nivel de brillo.

Procesamiento actual: productos nivel 1

- Factor de reflectancia: $F_R = \frac{\pi L_s}{F_n \; S_\Delta^{GOES}}$
- Reflectancia planetaria (beta): $\rho = \frac{F_R}{\cos\theta_z} = \frac{\pi L_s}{F_n \; S_\Delta^{GOES} \; \cos\theta_z}$
- Temperatura de brillo (canales IR): T_2, T_3, T_4 y T_6.

Procesamiento actual: productos nivel 2

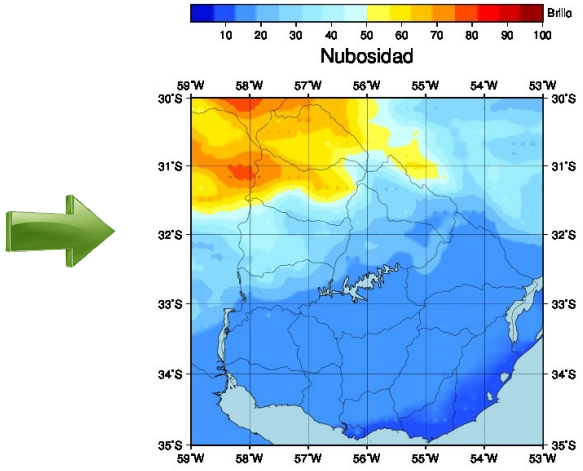
- Índice de nubosidad (beta): $\eta = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}}$
- **Irradiación solar a nivel de superficie.**

1 Introducción
- Contexto general
- Imágenes de Satélite

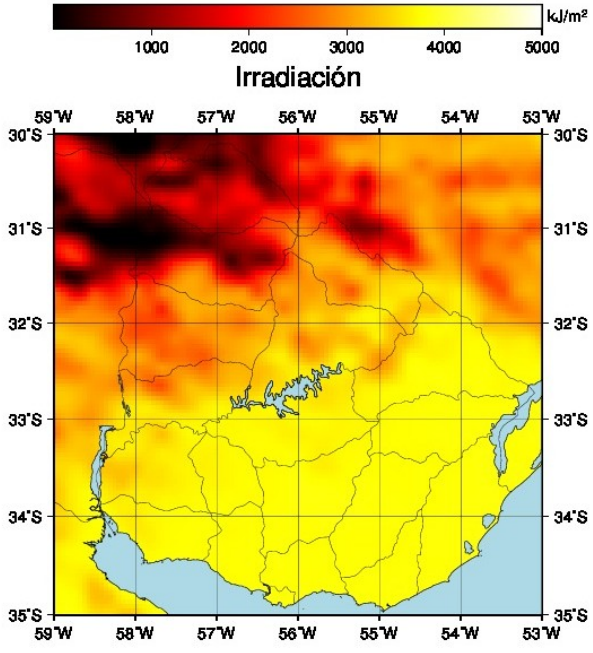
2 Estimación del recurso solar por satélite
- Modelo utilizado
- Resultados

3 Conclusiones
- Comentarios finales

Irradiación solar por satélite (1)



modelo



¿Por qué imágenes de satélite?

- Recurso solar presenta alta variabilidad espacial y temporal.
- Permite trabajar a escala diaria, horaria o intra-hora
- Interpolación o extrapolación de medidas tiene grandes limitaciones.

Irradiación solar por satélite (2)

Modelo básico: modelo estadístico pre-existente (JPT) [3][4].

- Modelo de regresión múltiple para irradiación horaria.
- Requiere definir una celda espacial en torno a los sitios.
- Utilizaba los counts digitales del satélite.
- Se deben ajustar 4 constantes a datos de superficie.

$$I = I_{sc}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \cos\theta_z \left(a + b\cos\theta_z + c\cos^2\theta_z\right) + d\left(B_m^2 - B_0^2\right)$$

- I_{sc} - Valor horario de la constante solar.
- $(r_0/r)^2$ - Correción por la distancia Tierra-Sol (excentricidad).
- $\cos\theta_z$ - Coseno del ángulo zenital.
- B_m - Brillo promedio en la celda observada.
- B_0 - Brillo de cielo claro para la celda observada.

[3] - Tarpley J. - Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *Journal of applied meteorology*. 1979; 18: 1172-1181.
[4] - Justus C., Paris M., Tarpley J. - Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sensing of Environment*. 1986; 20: 57-83.

Irradiación solar por satélite (3)

Problema: Modelo original basado en brillos no permitía largas estadísticas temporales por falta de calibración de imágenes.
Solución: utilizar Factores de Reflectancia en lugar de brillos.

Problema: Modelo original tenía errores sistemáticos de sub-estimación en cielo claro y sobre-estimación en cielo cubierto.
Solución: tratar las horas de cielo claras y nubladas por separado.

Primer modelo modificado: modelo a dos bandas (BD-JPT).

- El umbral se fijaba como la media de los valores de F_R.

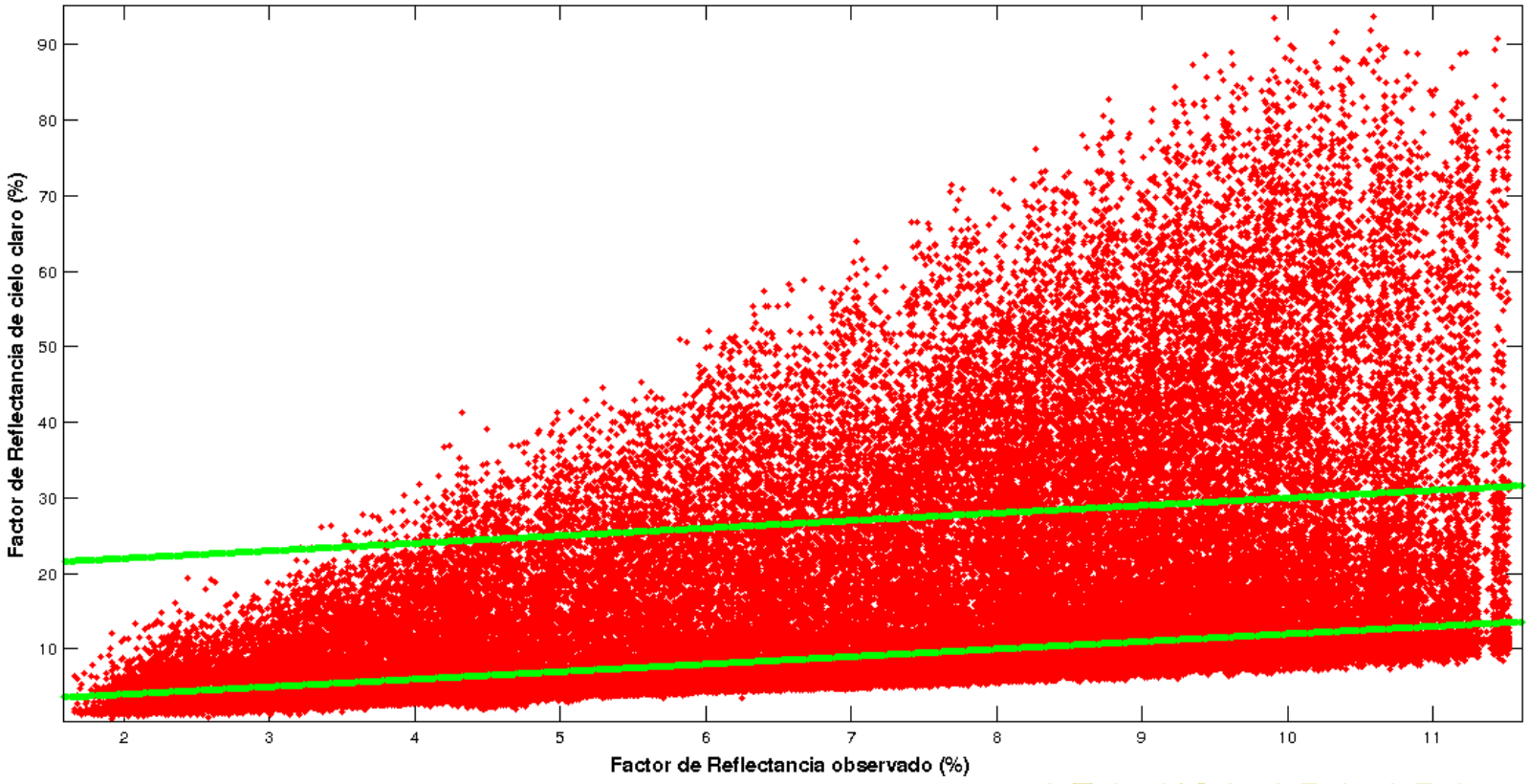
Segundo modelo modificado: modelo a tres bandas (RFD-JPT).

- Se distinguen horas claras, nubladas y parcialmente nubladas.
- Mejor performance a escala horaria (RMS diminuye un 1 %).
- Las bandas son fijadas con criterios físicos y no estadísticos.

Irradiación solar por satélite (4)

Modelo a 3 bandas:

- Cielo claro: F_R hasta 2 % por encima del de cielo claro.
- Parc. nublado: F_R entre 2 % y 20 % por encima del de cielo claro.
- Nublado: F_R mayor a 20 % por encima del de cielo claro.



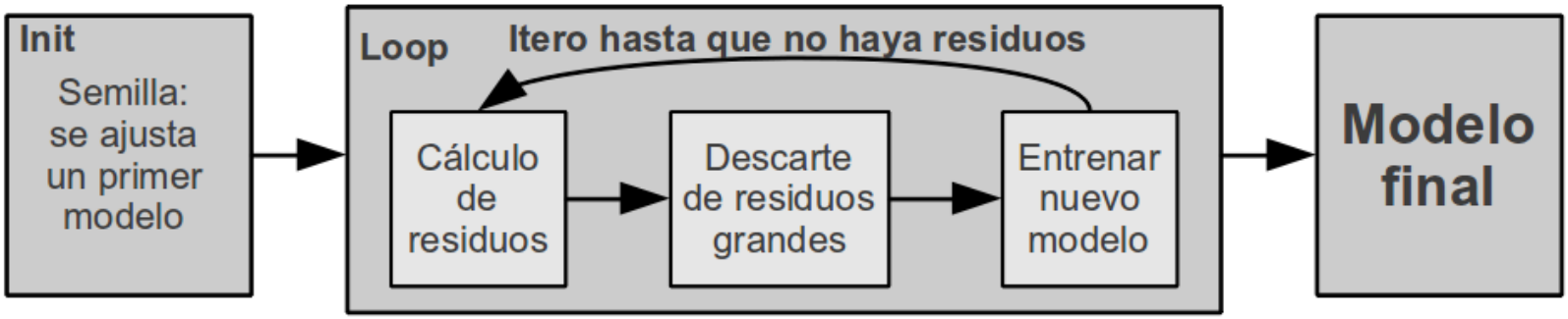
Irradiación solar por satélite (5)

Parametrización para el brillo de cielo claro F_{R0}:

$\rightarrow$ Expresión con dependencia espacio-temporal.

$$F_{R0} = A + B\cos\theta_z + C\sin\theta_z\cos\gamma + D\sin\theta_z\cos^2\gamma$$

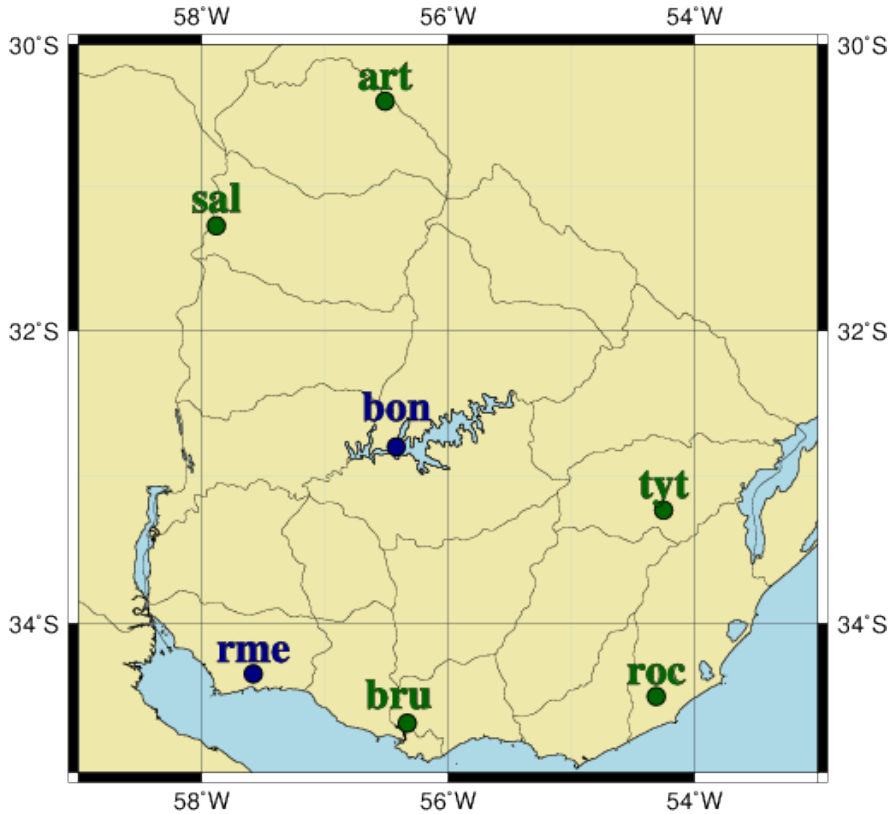
- γ es el ángulo azimutal entre la dirección del satélite y la del Sol.
- Debe ser entrenado con horas de cielo claro para cada sitio.
- Se realiza un proceso de filtrado iterativo de horas nubladas.



Irradiación solar por satélite (6)

Conjunto de datos horarios utilizados:

- **Verde:** Estaciones LES.
  Sensores: Kipp & Zonen.
- **Azul:** Estaciones UTE.
  Sensores: LiCor PV.
- Estadística:
  de 05/2010 al 08/2014.
- Criterio:
  cobertura y calidad.



Se entrena el modelo por validación cruzada al 10 %

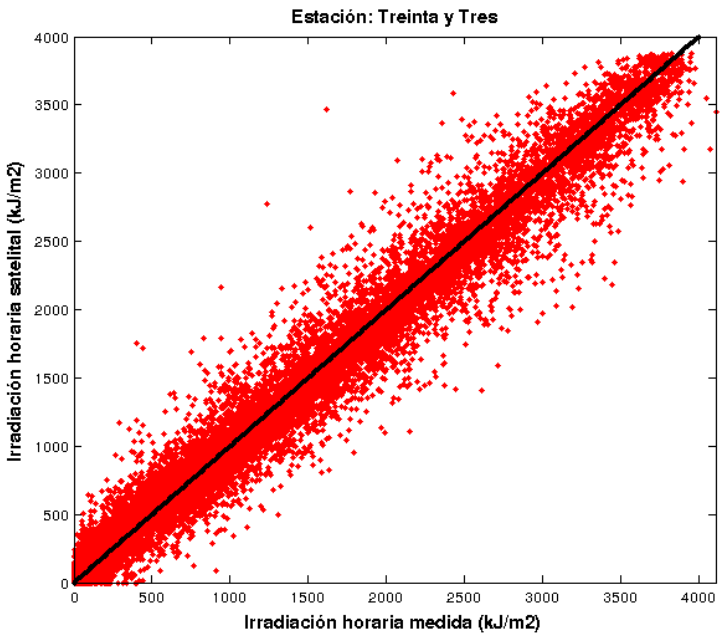
Irradiación solar por satélite (7)

Resultados de validación cruzada

- Ceoficientes para las 3 bandas.
- Indicadores de error: $RMS \approx 195$ kJ/m^2, **(12.5 %)**
  $MBD \approx 2$ kJ/m^2. $MAD \approx 130$ kJ/m^2

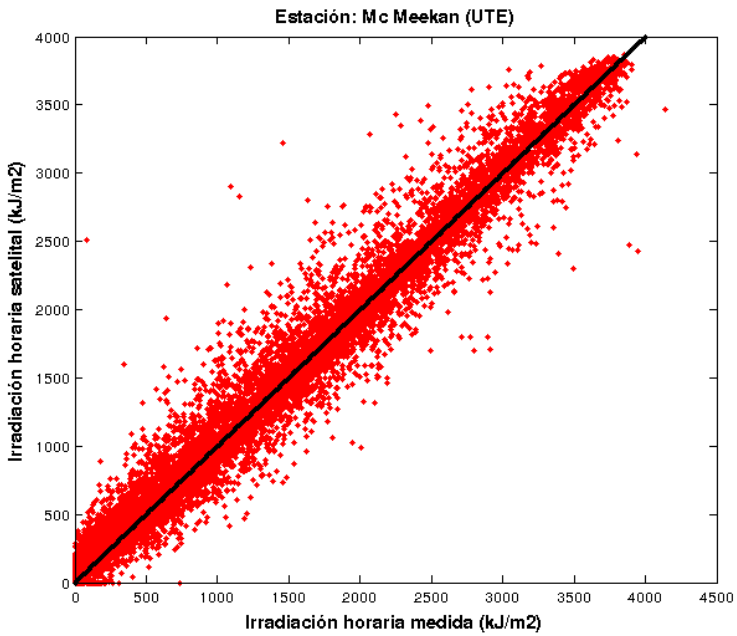
Gráficos de medida vs dato satelital:

Estación utilizada para MSUv2



$RMS \approx 190$ kJ/m^2

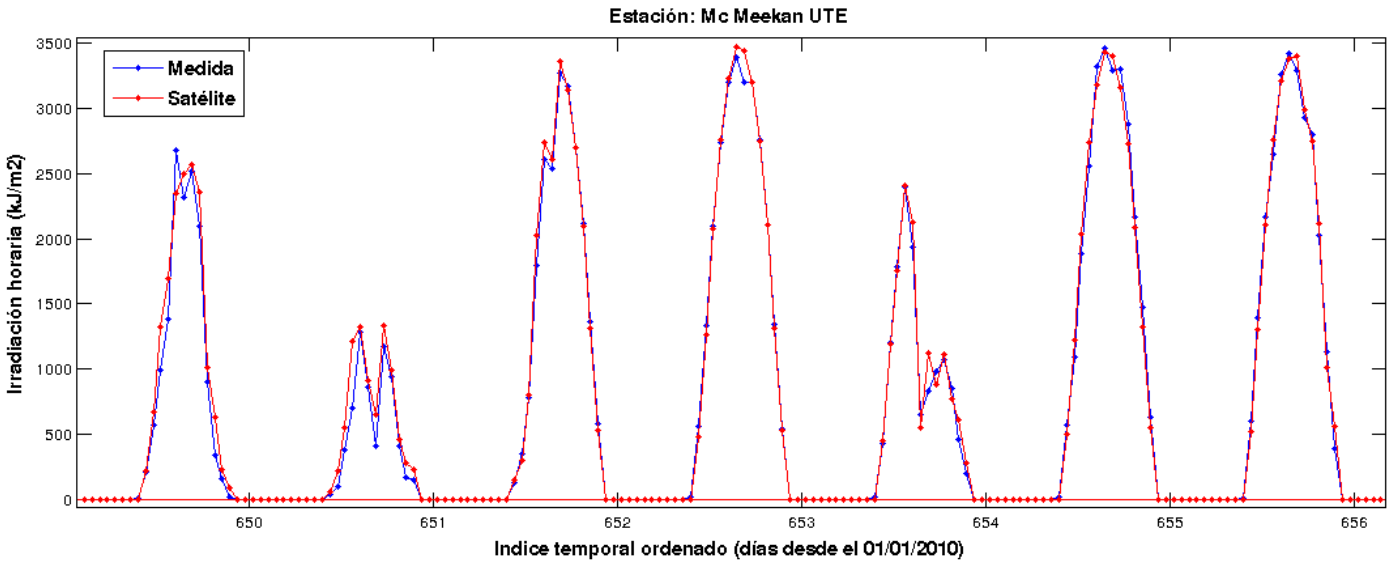
Estación independiente



$RMS \approx 185$ kJ/m^2

Irradiación solar por satélite (8)

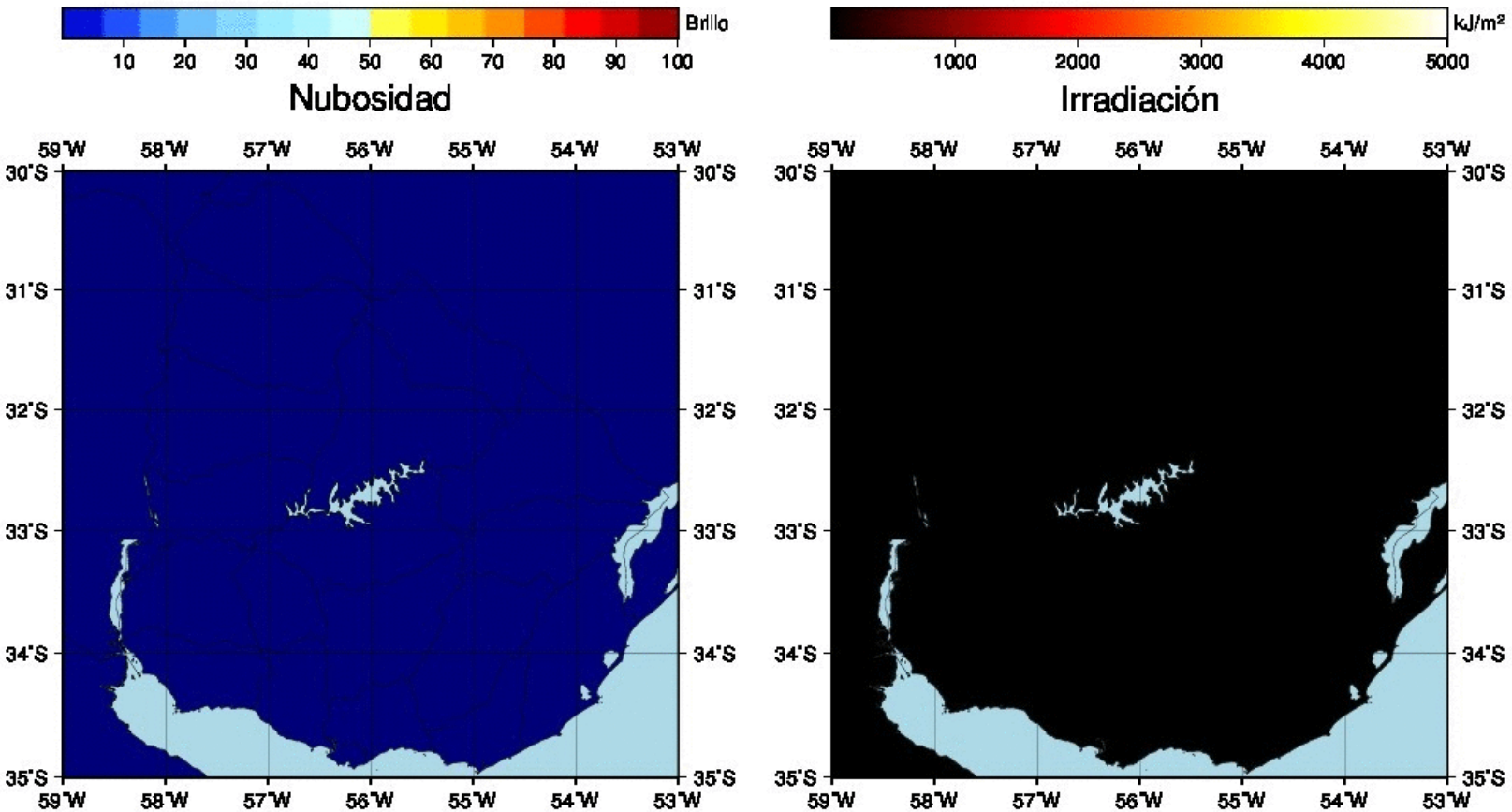
Serie temporal de medidas y dato satelital:



- Muy buena performance a escala horaria (12.5 %).
- Se trabaja en actualizar los indicadores de performance a escala diaria y mensual.
- Resultados anteriores de comparación con medidas:
  - A escala diaria: $\sim$ 7 %. A escala mensual: $\sim$ 4 %.

Irradiación solar por satélite (9)

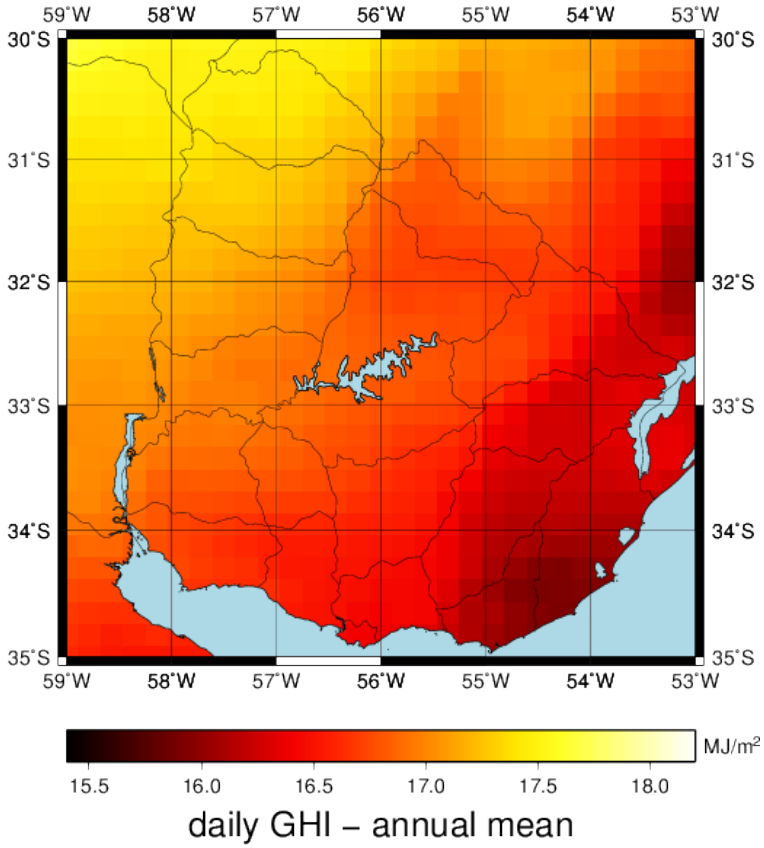
Hora a hora de la irradiación sobre Uruguay

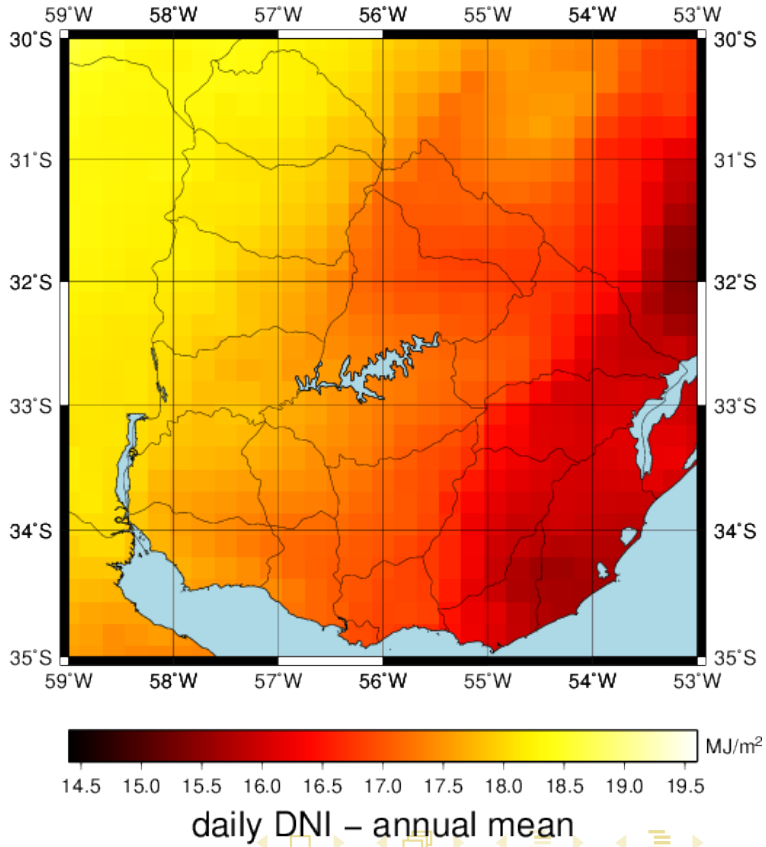


Fecha: 01/12/2010 Hora local: 04

Irradiación solar por satélite (10)

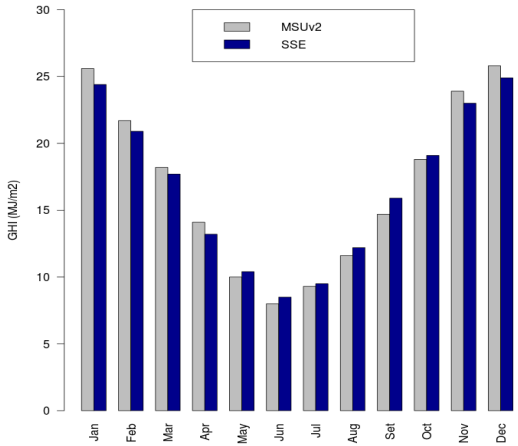
- Promediando la información de toda la base podemos elaborar Mapas Solares con información de largo plazo.
- Productos: global (GHI), difusa (DHI) y directa (BHI) en plano horizontal, y directa en incidencia normal (DNI).

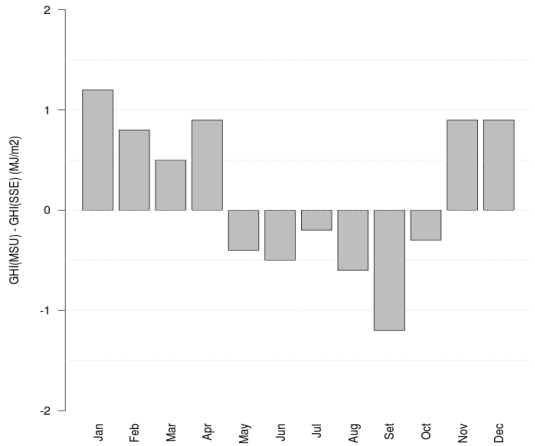




Irradiación solar por satélite (11)

Comparación con el modelo NASA/SSE:



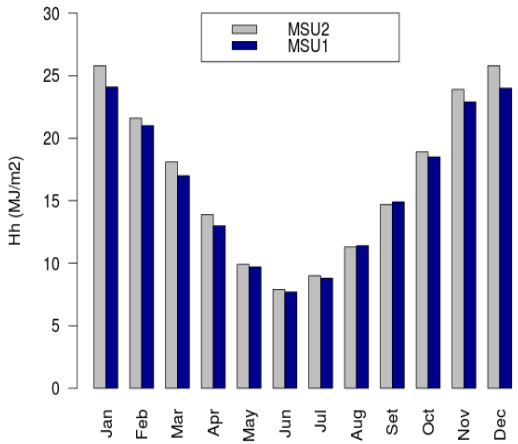


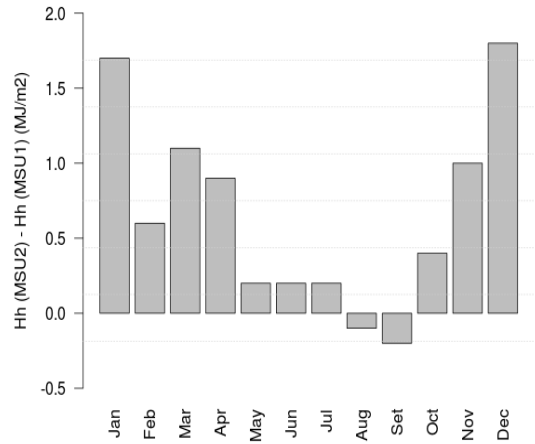
En una grilla de $1° \times 1°$ (22 sitios):

rMBD = 1.0 %

rRMSD = 1.3 %

Comparación el Mapa Solar anterior:





El recurso solar predicho es 7 % mayor que en el Mapa Solar previo (basado en horas de Sol)

1 Introducción
- Contexto general
- Imágenes de Satélite

2 Estimación del recurso solar por satélite
- Modelo utilizado
- Resultados

3 Conclusiones
- Comentarios finales

Comentarios finales

Presentamos...

- Capacidades actuales del LES en procesamiento satelital.
- El desarrollo de los primeros modelos satelitales ajustados especialmente para el territorio uruguayo.
- Metodología para la elaboración de la segunda versión del Mapa Solar del Uruguay (antes de fin de año).

Trabajo en curso...

- Segunda versión del Mapa Solar del Uruguay.
- Antena GOES: instalación de un receptor en Uruguay.
  - Proyecto en colaboración con ANTEL.
- Estimación de potencial fotovoltaico (factor de planta).
- Desarrollo de otros modelos para irradiación solar.
- ¿Otros productos satelitales?
  - Radiación PAR (fotosintética).
  - Clasificación de nubes (útil como insumo de otros productos).
  - Integración a modelos de clima (medida de performance).

LES

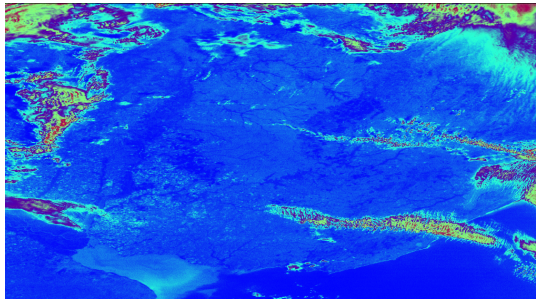
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Muchas gracias por su atención

¿Preguntas?

Ing. Rodrigo Alonso Suárez

r.alonso.suarez@gmail.com

Laboratorio de Energía Solar (http://les.edu.uy)

Departamento de Física, CENUR Noroeste, UdelaR.