

# Estimación de Radiación PAR



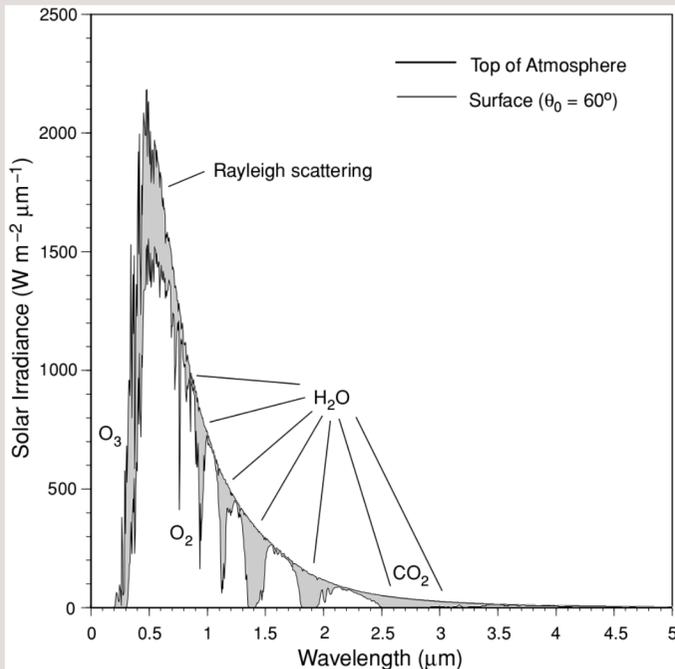
Rodrigo Alonso-Suárez  
[r.alonso.suarez@gmail.com](mailto:r.alonso.suarez@gmail.com)



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

## RADIACIÓN PAR: Photosynthetic Active Radiation

La porción del espectro solar que utilizan las plantas para el proceso de fotosíntesis. Tiene un rol central en el crecimiento vegetal y la producción de biomasa. Subparte del espectro solar comprendido entre 400-700nm.



### NOTACIÓN

Irradiancia solar: potencia solar incidente (W/m<sup>2</sup>)

Irradiación solar: energía solar incidente (J/m<sup>2</sup>)

Rs - irradiación/irradiancia de banda ancha (global)  
(entre 280-2800 nm)(en J/m<sup>2</sup> o W/m<sup>2</sup> según corresponda)

Rp - irradiación/irradiancia PAR (global)  
(entre 400-700 nm)(en J/m<sup>2</sup> o W/m<sup>2</sup> según corresponda)

$$R_p = \int_{400}^{700} L_\lambda d\lambda$$

Qp - cantidad/flujo de fotones incidentes (global)  
(entre 400-700 nm)(en umol/m<sup>2</sup> o umol/s m<sup>2</sup> según corresponda)

$$Q_p = \frac{1}{hc} \int_{400}^{700} \lambda L_\lambda d\lambda$$

## RADIACIÓN PAR: Photosynthetic Active Radiation

$$R_p = \int_{400}^{700} L_\lambda d\lambda \quad \begin{array}{c} \text{su conversión precisa} \\ \text{no es directa} \end{array} \quad \longleftrightarrow \quad Q_p = \frac{1}{hc} \int_{400}^{700} \lambda L_\lambda d\lambda$$

Depende de la distribución espectral de la radiación solar

Se puede utilizar con bajo error el factor de conversión 4.57 umol/J (para global)

La misma situación se tiene si se quiere modelar por separado directa y difusa  
( $R_{pd} \leftrightarrow Q_{pd}$  y  $R_{pb} \leftrightarrow Q_{pb}$ , tienen espectros distintos)

De todas formas, lo que interesa es  $Q_p$ ! -> los radiómetros PAR están calibrados para medir  $Q_p$

## FRACCIÓN PAR:

$$F_p = \frac{Q_p}{R_s}$$

(no es adimensional)  
(está en umol/J)

Conocer la fracción PAR permite estimar  $F_p$  a partir de  $R_s$  (medida o estimación)

Varía con el estado de la atmósfera (al variar la distribución espectral)

Se puede estudiar a toda escala temporal (minutal, horaria, **diaria**, mensual, etc.)

Su comportamiento depende de las particularidades meteorológicas locales

## FRACCIÓN PAR: revision bibliográfica de valores reportados

Escobedo et al. (2011): se reportan valores diario promedio de  $F_p$  en distintas partes del mundo  
Hay valores entre 1.92 y 2.38  $\mu\text{mol}/\text{J}$  dependiendo del sitio (24% de variación)

Los valores día a día presentan variabilidad:

Escobedo et al. (2011): valores entre 2.05 y 2.50  $\mu\text{mol}/\text{J}$  (20% de la media).

Jacovides et al. (2007): valores entre 1.74 y 2.38  $\mu\text{mol}/\text{J}$  (30% de la media).

Los valores hora a hora presentan mayor variabilidad:

Escobedo et al. (2011): valores entre 1.85 y 2.75  $\mu\text{mol}/\text{J}$  (40% de la media).

Jacovides et al. (2004):

Variación del 7% en el valor medio de  $F_p$  entre días de cielo cubierto y días de cielo despejado.

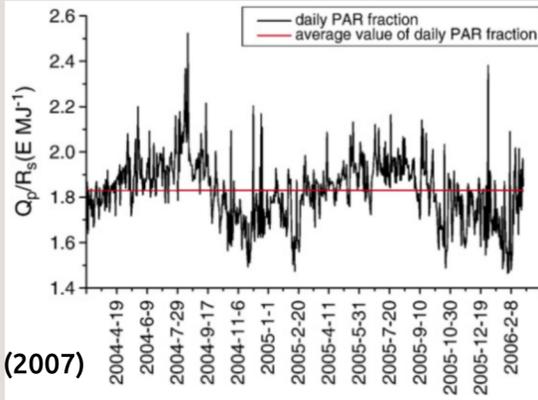
Si se comparan las horas despejadas y nubladas, esta variación crece a 14-15%.

Dependiendo del sitio, se observan variaciones estacionales entre 4% y 16% (medias mensuales)

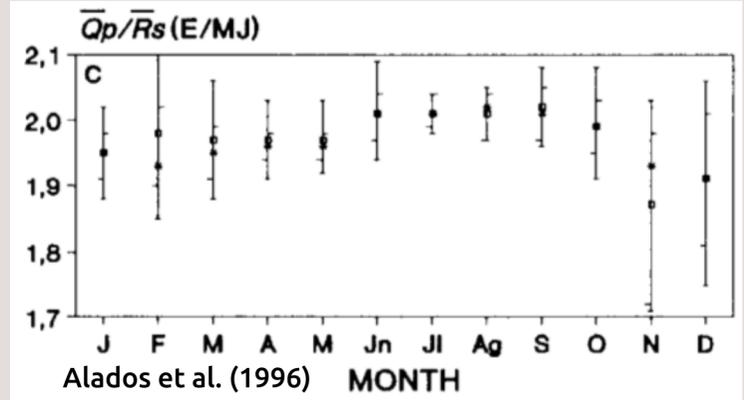
BrittonDodd1976, Howell1983, UdoAro1999, Papaioannou1996, Jacovides2004, Hu2007, Wang2013, Vindel2018, Nkwole2018

TODAS ESTAS VARIACIONES SE DEBEN A QUE EL VALOR DE LA FRACCIÓN PAR  
DEPENDE DEL ESTADO ACTUAL DE LA ATMÓSFERA (situación meteorológica)

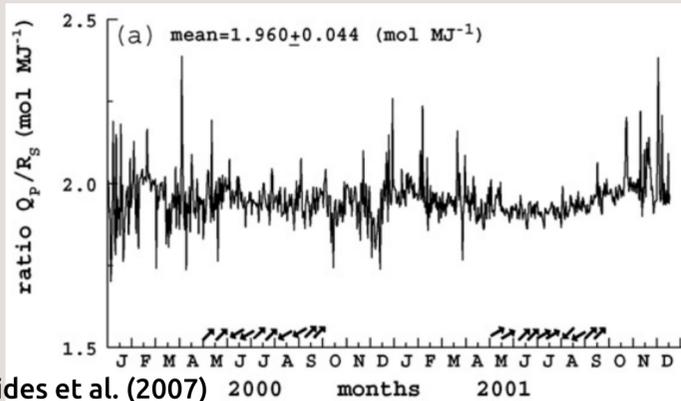
# FRACCIÓN PAR: revision bibliográfica de valores diarios



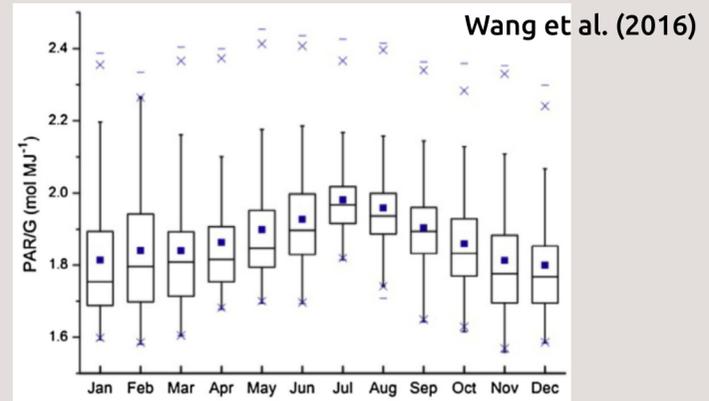
Hu et al. (2007)



Alados et al. (1996) MONTH



Jacovides et al. (2007)

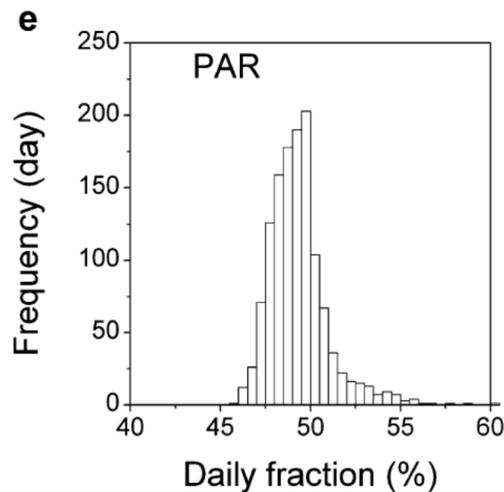
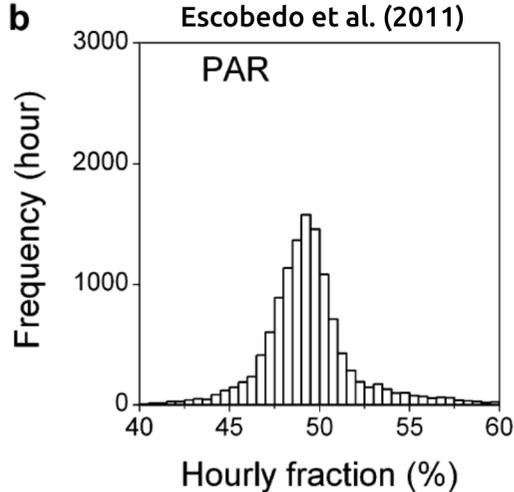
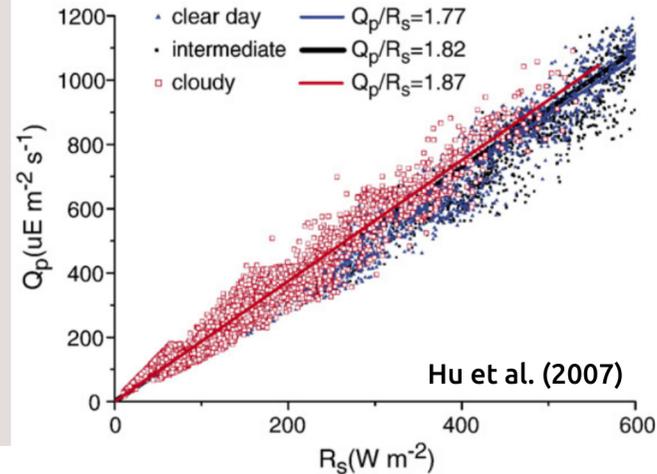


Wang et al. (2016)

## FRACCIÓN PAR: otras comparaciones

Se observa una distribución unimodal para los valores horarios y diarios de fracción PAR

La presencia de nubosidad afecta el valor promedio de la fracción PAR



RATIO DE ENERGÍA  
O DE POTENCIA

$$F'_p = \frac{R_p}{R_s}$$

## FRACCIÓN PAR: esencialmente dos formas de modelado

$$F_p = \frac{Q_p}{R_s} = cte$$

Como un valor constante o promedio.  
 Promedio anual de valores diarios  
 Promedios mensuales de valores diarios (estacionalidad)  
 Se obtienen factores de conversión útiles

$$F_p = \frac{Q_p}{R_s} = f(x_1, x_2, \dots)$$

Como función de otras variables que puedan ser calculadas, medidas o estimadas (accesibles!)

w - contenido de agua precipitable

AOD - profundidad óptica de aerosoles (550 nm)

AM - Masa de Aire (AM = 1 / CZ)

N - Nubosidad por satélite (Albedo)

$$k_t = \frac{R_s}{R_{s0}}$$

ÍNDICE DE CLARIDAD

$$f_d = \frac{R_{sd}}{R_s}$$

FRACCIÓN DIFUSA

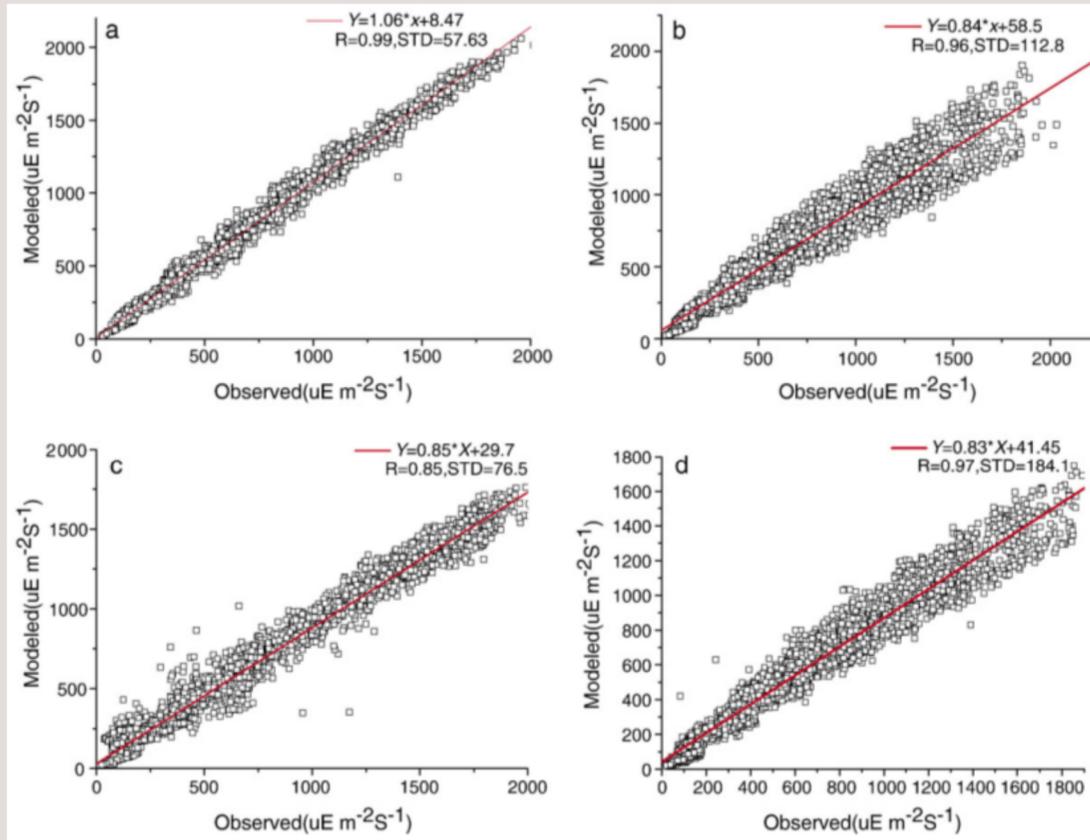
$$\epsilon = \frac{1}{f_d}$$

CLARIDAD DEL CIELO

$$\Delta = \frac{R_{sd}}{R_{s0}} = f_d k_t$$

BRILLO DEL CIELO

## FRACCIÓN PAR: estimación de $Q_p$ por modelos de fracción PAR



## FRACCIÓN PAR: ¿para qué modelar la fracción PAR?

Para estimar en forma más precisa  $Q_p$  a partir de  $R_s$

$$Q_p = F_p \times R_s$$

Se debe modelar la fracción PAR a las distintas escalas temporales de interés (15-minutal, horaria y **diaria**)

## ESTIMAR $Q_p$ EN SITIOS DONDE SÓLO SE MIDE $R_s$

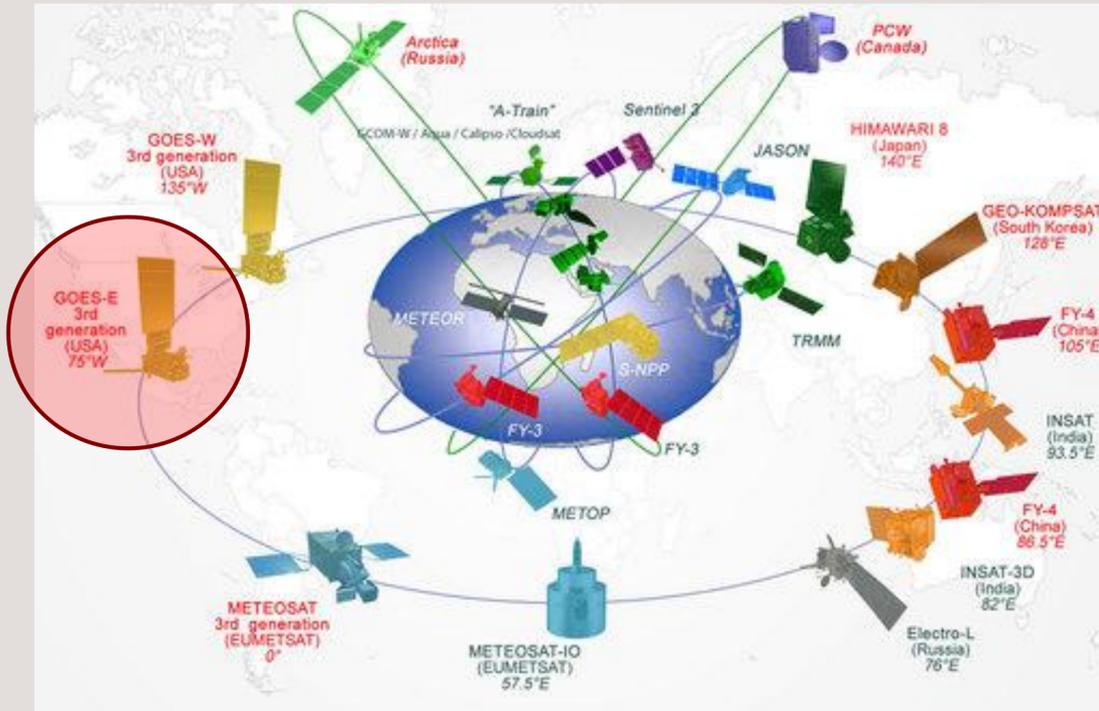
El error horario en la parametrización de  $F_p$  ronda el 7-9%.

## ESTIMAR $Q_p$ POR SATÉLITE

A PARTIR DE UNA ESTIMACIÓN SATELITAL DE  $R_s$   
(que ya sabemos hacer "bien" en el LES)

El error de esta estimación por satélite ronda el 22-29% horario (con modelos genéricos). Es de esperar que se reduzca a 10-15% utilizando modelos satelitales localmente ajustados. Permitiría generar valores diarios con incertidumbre de 7-8% para todo el territorio.

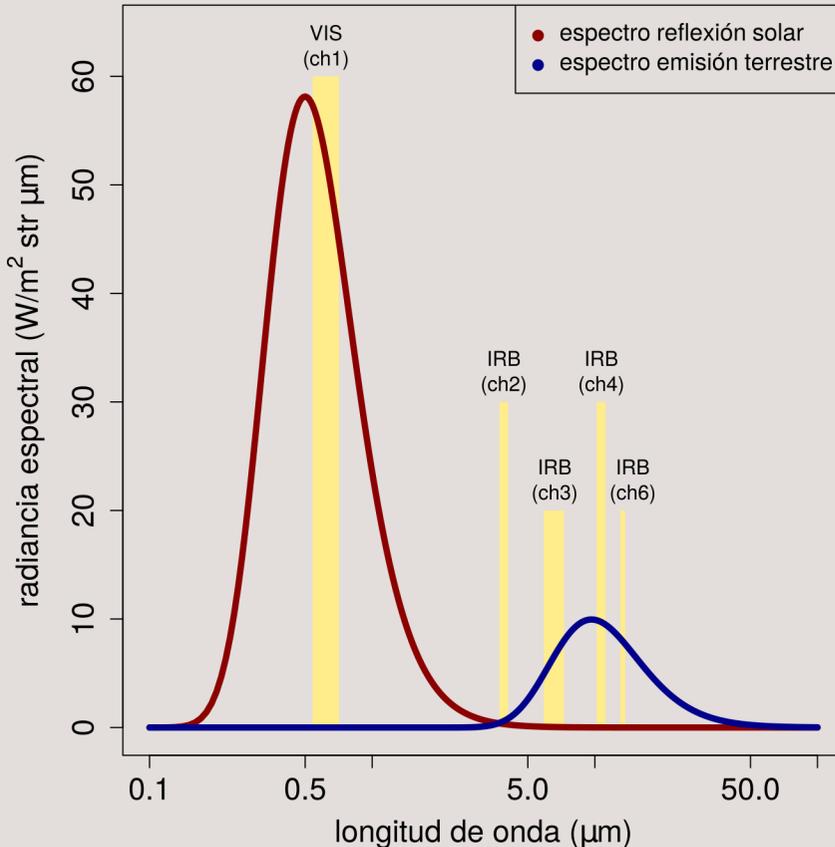
# INFORMACIÓN SATELITAL



LA IRRADIACIÓN SOLAR ES UN FENÓMENO ALTAMENTE VARIABLE

REQUIERE IMÁGENES CON ALTA CADENCIA **TEMPORAL** Y RESOLUCIÓN ESPACIAL ADECUADAS

## Bandas espectrales: ej. GOES-13



Canales: **1 visible** + 4 infrarrojos

Resolución espacial:

**1 km (canal visible)**

4 km (canales infrarrojos)

Resolución temporal:

**30 minutos (sudamérica)**

15 minutos (américa del norte)

### BASE DE IMÁGENES LOCAL

Desde 01/2000 a la fecha

Uruguay y la región

+ 800 000 imágenes

+ 5 TB de información

### Satélite nuevo: GOES-R

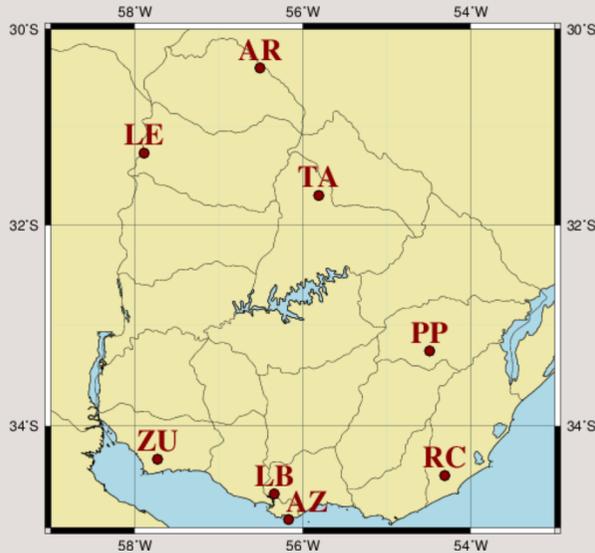
Doble de resolución espacial (500 m visible)

Imágenes cada 15 minutos aseguradas

16 bandas espectrales

**Mucho mayor volumen  
de información!**

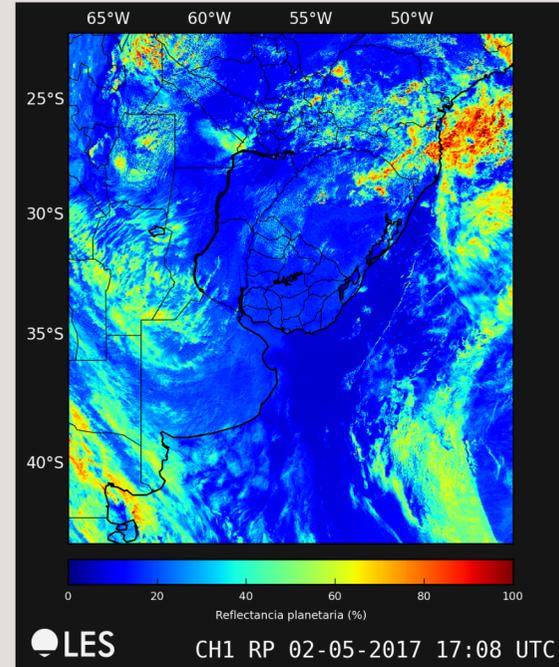
## Medidas en Tierra



relación  
complementaria



## Satélite



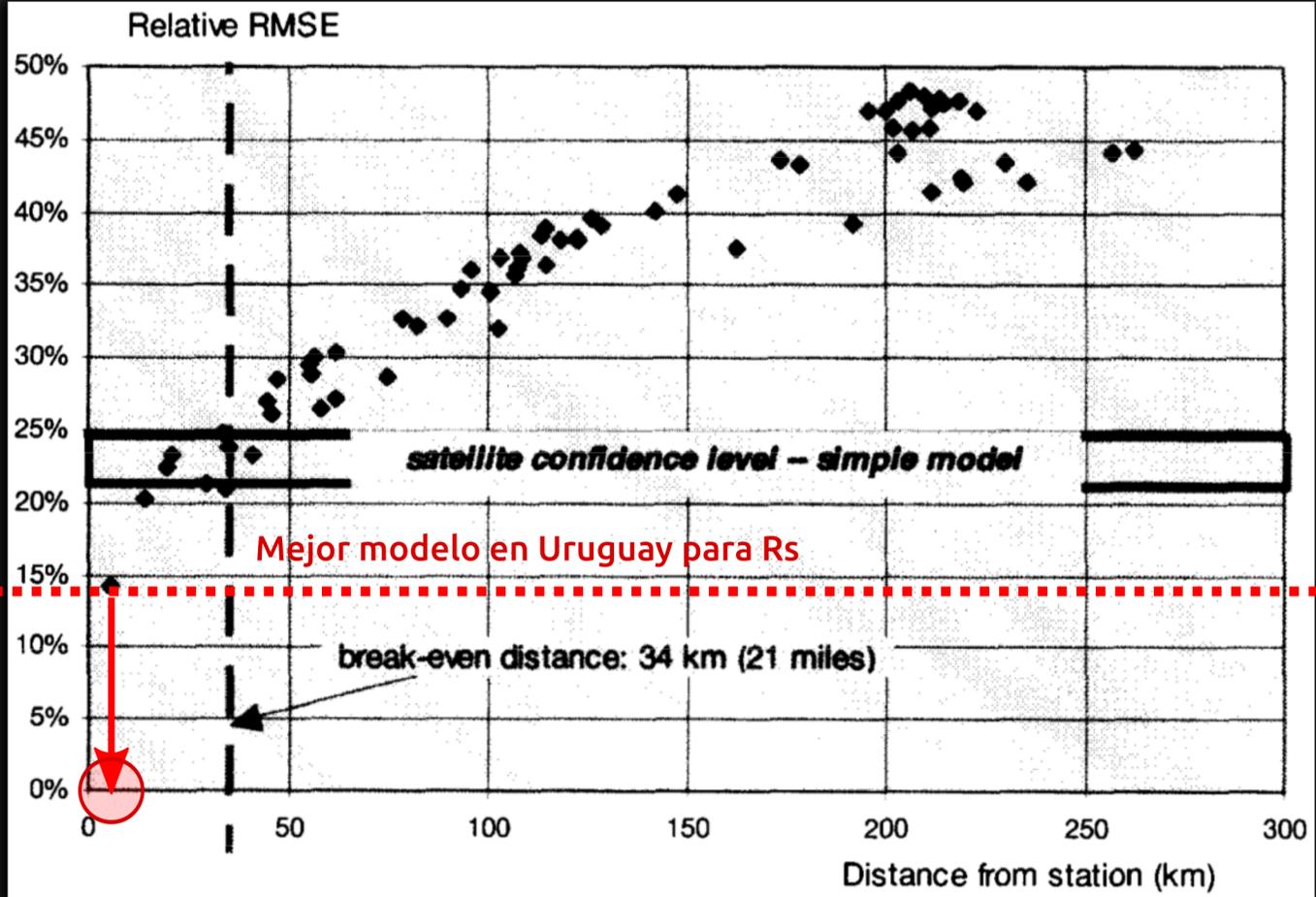
Baja incertidumbre en el sitio específico.

No se puede medir en todos los puntos.

Estadística de medida acotada en el tiempo.

Mide en todos los puntos con resolución de ~1km

Existen más de 20 años de imágenes de satélite.

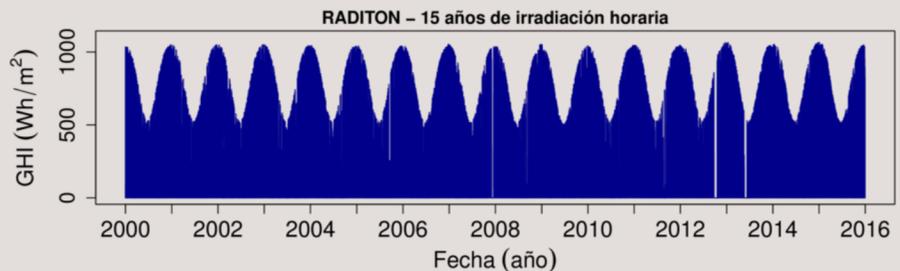
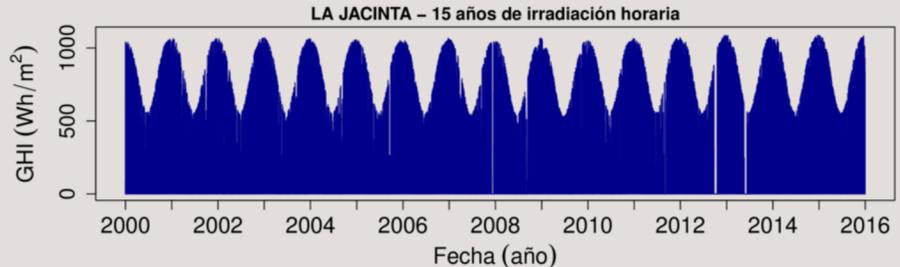
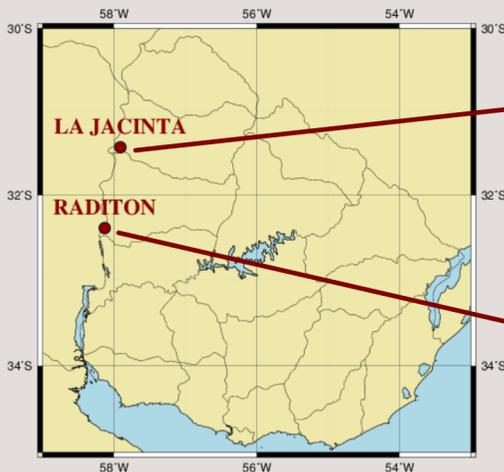


# APLICACIÓN DEL MODELO SATELITAL

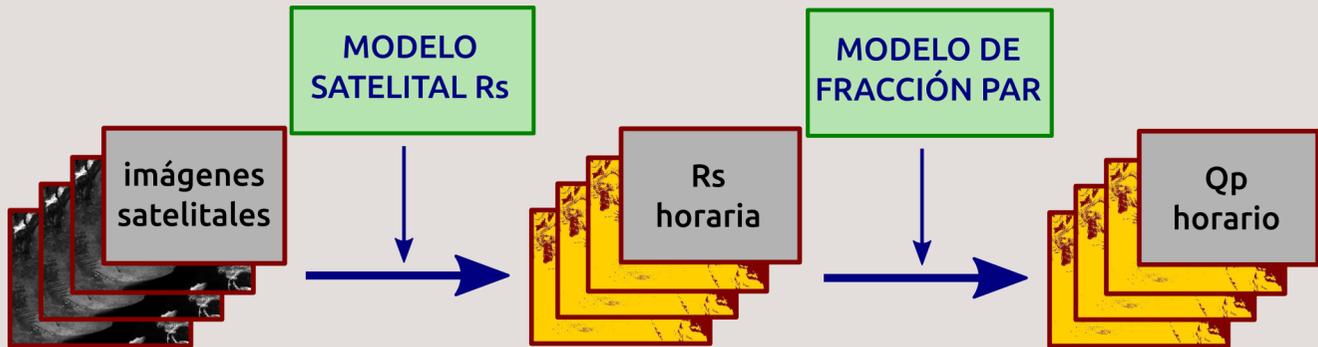
USAMOS UN MODELO PROMEDIO PARA URUGUAY (coeficientes promedio)

SE UTILIZAN LAS MEDIDAS DE MENOR INCERTEZA PARA DEFINIR LOS COEFICIENTES PROMEDIO

LOS MODELOS PERMITEN ESTIMAR LA IRRADIACIÓN SOLAR **HORA A HORA** PARA CUALQUIER PUNTO DEL TERRITORIO (CON UNA RESOLUCIÓN DE  $\sim 2$  km) DESDE EL 01/2000 A LA FECHA



## ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN PAR UTILIZANDO MODELO DE FRACCIÓN PAR (tipo i)

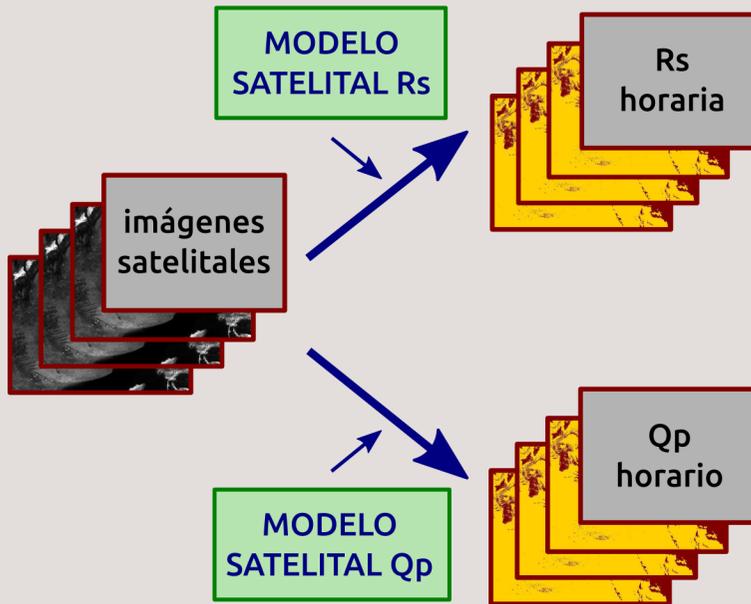


¿Cuál es el mejor modelo de fracción PAR operacional para utilizar en Uruguay y la región?

¿Qué incertidumbres horaria y diaria podemos alcanzar?

Objetivo: <15% horario y <10% diario

# OTRA FORMA DE ESTIMAR RADIACIÓN PAR POR SATÉLITE (tipo ii)



¿CÓMO?

SE REQUIERE UN MODELO ESPECTRAL DE CIELO CLARO DE DONDE SE PUEDA ESTIMAR  $Q_p^{csk}$

$$Q_p = Q_p^{csk} \times f(\eta)$$

MODELOS DE CIELO CLARO ESPECTRALES

agua precipitable  
ozono estratosférico  
cantidad y tipo de aerosoles

MODIS-Terra, MODIS-Aqua  
Reanálisis MERRA-2

Algunos modelos usados para  $Q_p$   
SMARTS (Gueymard), McClear (Lefebvre)  
Indicadores de desempeño confusos

REST2 -> aún no utilizado!

## HOJA DE RUTA

### OBJETIVOS:

Mejorar el conocimiento local de la radiación PAR: climatología, estacionalidad, relación con ENSO.  
Disponibilizar información operativa (cadencia diaria) e histórica (series ad-hoc).  
Profundizar el vínculo con el sector agropecuario.

### DESARROLLO CLAVE:

Lograr modelos satelitales de baja incertidumbre para estimar radiación PAR en la región.

### ACCIONES:

Generación de nuevas capacidades de medida de radiación PAR: ampliar capacidad de medida.

Desarrollar modelos para estimación de  $F_p$  y la estimación indirecta de  $Q_p$  (tipo i).

Desarrollar modelos para la estimación satelital directa de  $Q_p$  (tipo ii).

Decidir qué estrategia es la mejor para estimación de radiación PAR en la región.

Aplicar el modelo con 20 años de imágenes de satélite y caracterizar el recurso PAR.

Desarrollar capacidad e infraestructura GOES-R operacional!

## PARA TERMINAR ...

SE TRATA DE UN PRIMER PASO HACIA UNA MAYOR COLABORACIÓN CON EL SECTOR AGROPECUARIO

SE TRATA DE UN SEGUNDO PASO EN EL CONOCIMIENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR ESPECTRAL EN URUGUAY



UV - Aplicaciones médicas, envejecimiento de materiales

VIS/PAR - crecimiento vegetal, iluminación natural

NIR - infrarrojo cercano

Hasta ahora estamos modelando por bandas espectrales

Para algunas aplicaciones se requiere mayor conocimiento espectral (paso base)

El sector agropecuario es uno de ellos!  
"Calidad" de la luz (plantas reflejan el verde)

# Muchas gracias por la atención



LABORATORIO DE  
ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

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

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

Dos sedes del Laboratorio de Energía Solar:  
Centro Regional Universitario Litoral Norte (UdelaR, Salto)  
Facultad de Ingeniería (FING/UdelaR, Montevideo)

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