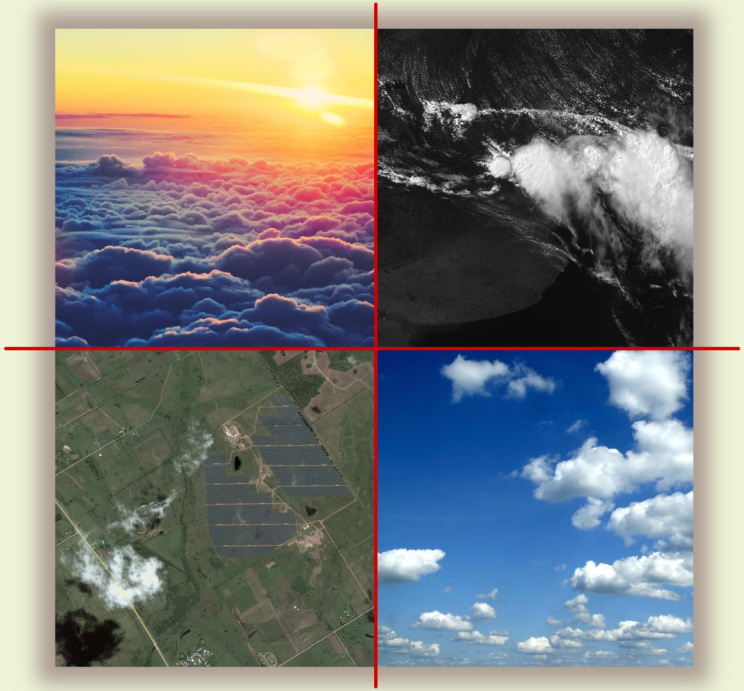
LES

METODOLOGÍAS ACTUALES PARA LA ESTIMACIÓN Y PRONÓSTICO DE LA ENERGÍA SOLAR



Rodrigo Alonso Suárez

r.alonso.suarez@gmail.com

@ralonsosuarez

Laboratorio de Energía Solar
Facultad de Ingeniería, Udelar, Uruguay
http://les.edu.uy

LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

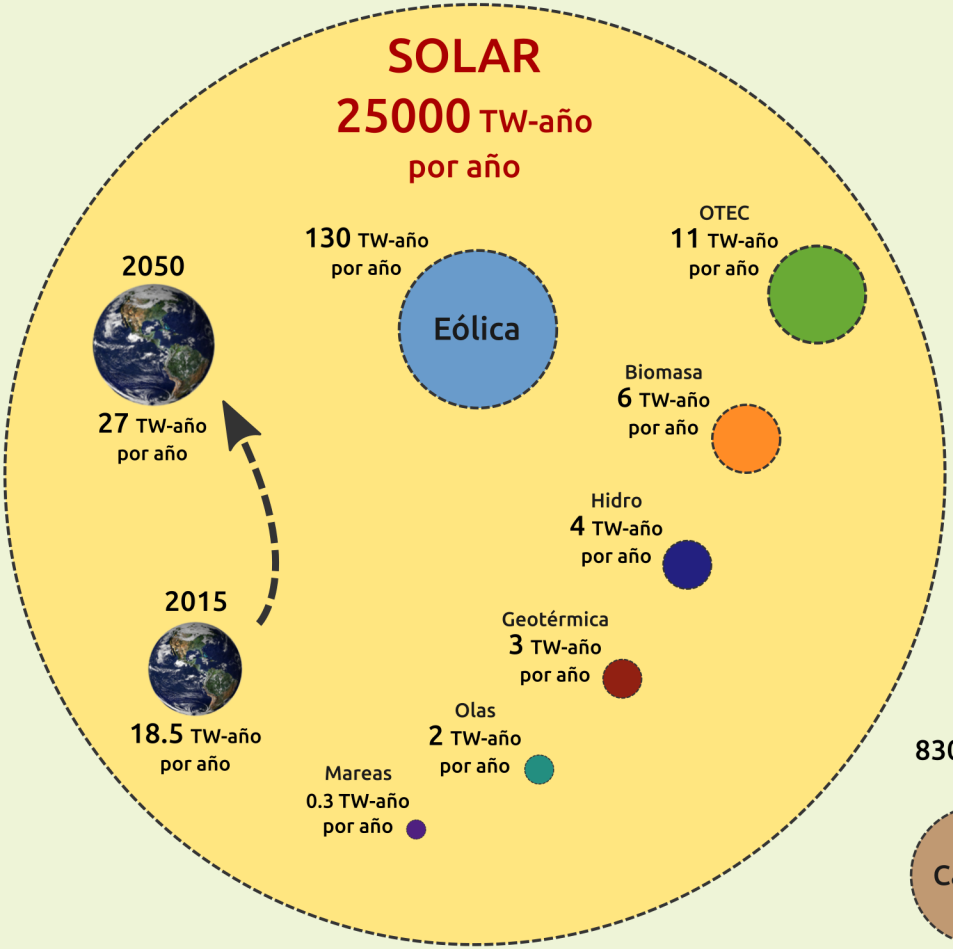
AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. ESTIMACIÓN DEL RECURSO SOLAR

3. PRONÓSTICO DEL RECURSO SOLAR

4. CONCLUSIONES



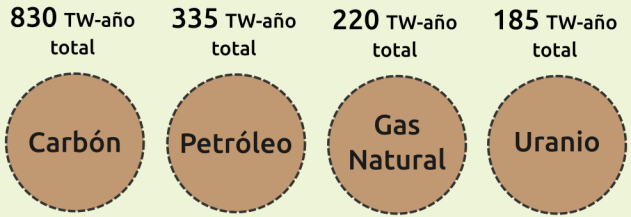
Demanda mundial:
2015: 18.5 TW-año/año

Renovables (por año):
* Máximo estimado

Solar:	25 000 TW-año/año
Eólica*:	130 TW-año/año
OTEC*:	11 TW-año/año
Biomasa*:	6 TW-año/año
Hidro:	4 TW-año/año
Geotérm.*:	3 TW-año/año
Olas*:	2 TW-año/año
Mareas:	0.3 TW-año/año

No Renovables (total):
reservas conocidas

Carbón:	830 TW-año
Petróleo:	335 TW-año
Gas Natural:	220 TW-año
Uranio:	185 TW-año



Ref.: Perez et al. A Fundamental Look At Supply Side Energy Reserves For The Planet.

SOLAR
25000 TW-año
por año

2050

27 TW-año por año

TODAS LAS RESERVAS DE COMBUSTIBLES FÓSILES REPRESENTAN ~6% DE LO QUE EL SOL ENTREGA EN UN AÑO

HAY ~1000 VECES MÁS ENERGÍA SOLAR DISPONIBLE QUE EL CONSUMO ANUAL DE TODO EL PLANETA

2015

18.5 TW-año por año

EL POTENCIAL SOLAR ES EL MAYOR DISPONIBLE

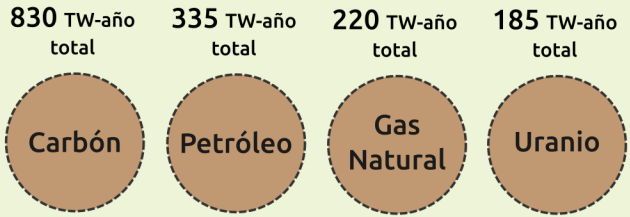
Demanda mundial:
2015: 18.5 TW-año/año

Renovables (por año):
* Máximo estimado

Solar:	25 000 TW-año/año
Eólica*:	130 TW-año/año
OTEC*:	11 TW-año/año
Biomasa*:	6 TW-año/año
Hidro:	4 TW-año/año
Geotérm.*:	3 TW-año/año
Olas*:	2 TW-año/año
Mareas:	0.3 TW-año/año

No Renovables (total):
reservas conocidas

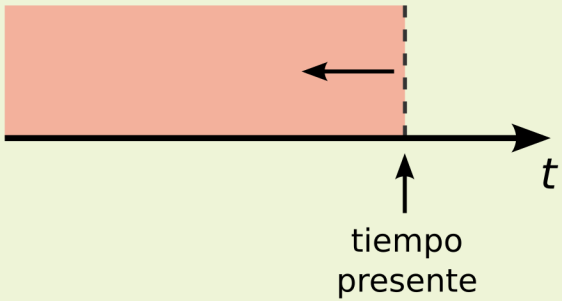
Carbón:	830 TW-año
Petróleo:	335 TW-año
Gas Natural:	220 TW-año
Uranio:	185 TW-año



Ref.: Perez et al. A Fundamental Look At Supply Side Energy Reserves For The Planet.

ESTIMACIÓN

CONOCER LA ENERGÍA SOLAR OCURRIDA EN UN SITIO



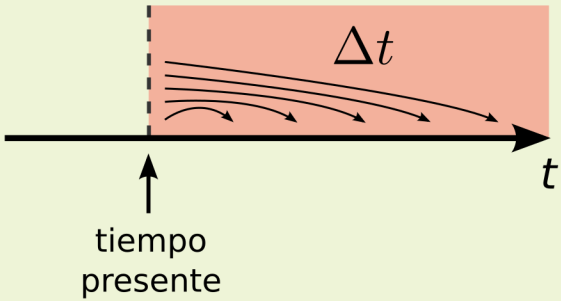
Conocer el recurso para un periodo específico

Conocer el recurso en sitios específicos (lat, lon)

¿A qué escala temporal? Minutal, 10-minutal, horaria, diaria, mensual, anual, varios años.

PRONÓSTICO

ANTICIPAR LA ENERGÍA SOLAR QUE HABRÁ DISPONIBLE EN UN SITIO



Anticipar la disponibilidad futura ¿horizonte?

Pronosticar en sitios específicos (lat, lon)

Corto plazo: diario, intra-día, intra-hora
Largo plazo: mensual, anual, climatológico

IRRADIACIÓN → MODELO DE PLANTA → GENERACIÓN

¿COMPONENTE DE LA IRRADIACIÓN SOLAR?

Global en Plano Horizontal (GHI)

Directa en Incidencia Normal (DNI)

Difusa en Plano Horizontal (DHI)

Global en plano inclinado (POA, GTI)

¿TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN?

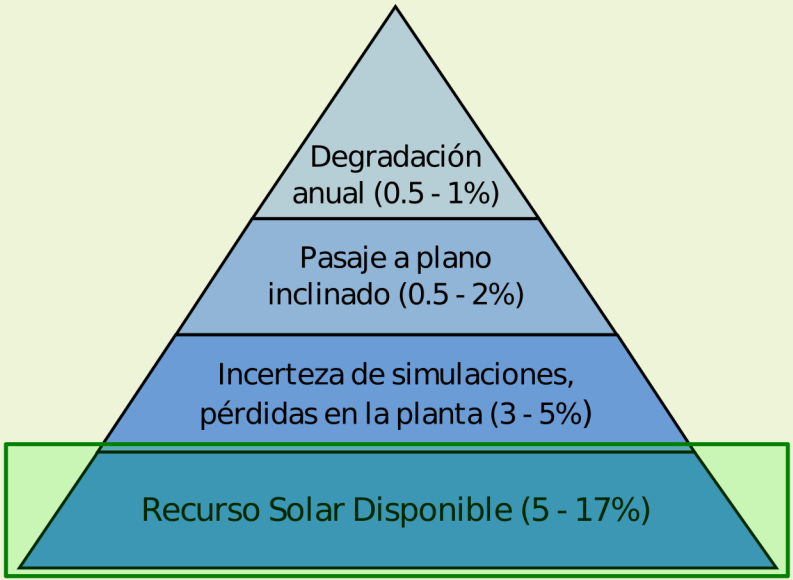
ESTIMACIÓN DEL RECURSO SOLAR

INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN DE UN PROYECTO SOLAR (PV)

¿Por qué es importante? →

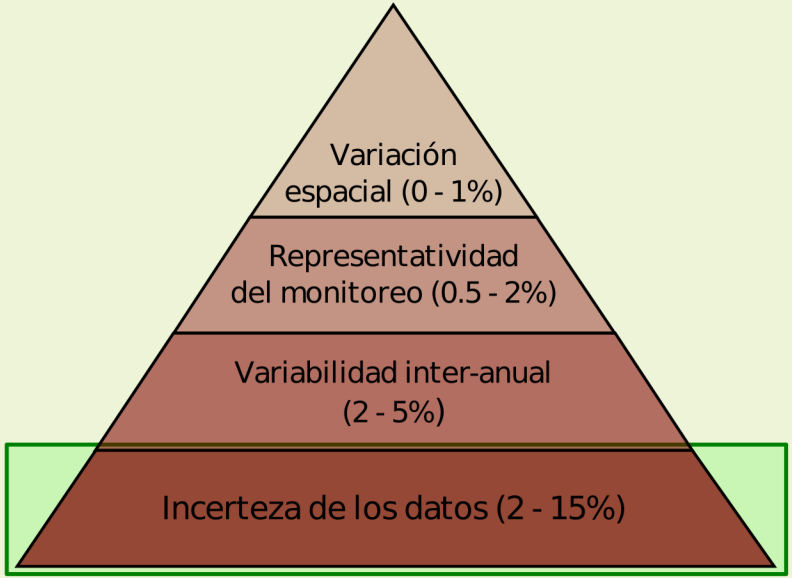
INCERTIDUMBRE = RIESGO FINANCIERO

INCERTEZA EN LA EVALUACIÓN DE UN PROYECTO



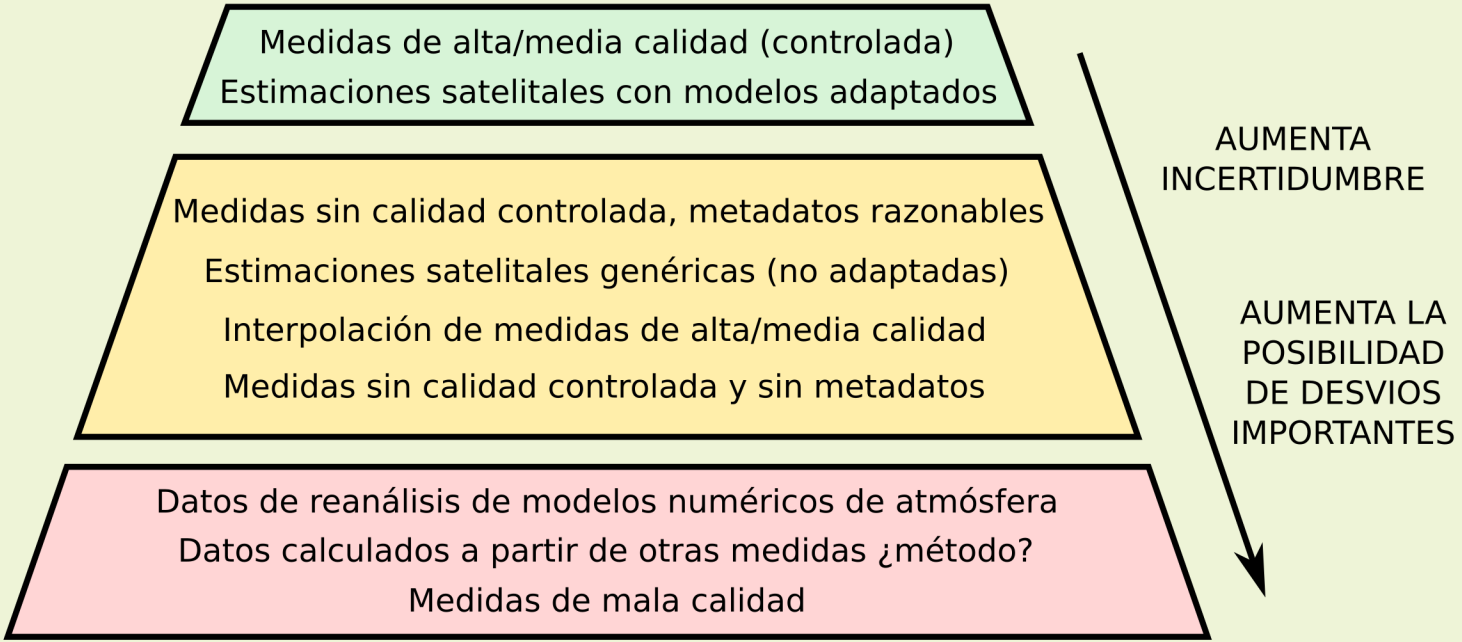
LA INCERTIDUMBRE EN EL RECURSO SOLAR DISPONIBLE ES LA MAYOR DE TODAS

INCERTEZA EN EL RECURSO SOLAR DISPONIBLE



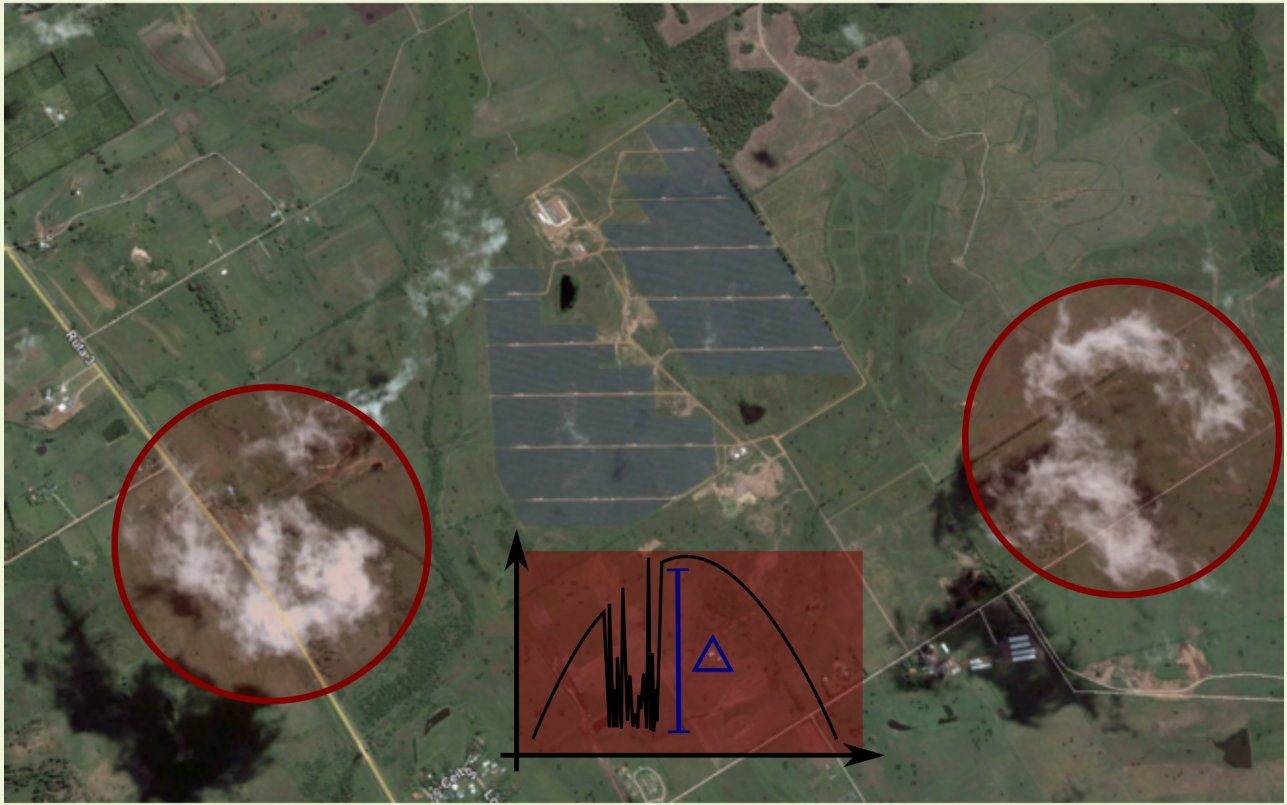
LA INCERTIDUMBRE EN LOS DATOS BASE UTILIZADOS ES LA MAYOR DE TODAS

¿QUÉ ORIGEN PUEDE TENER UN CONJUNTO DE DATOS DEL RECURSO SOLAR?

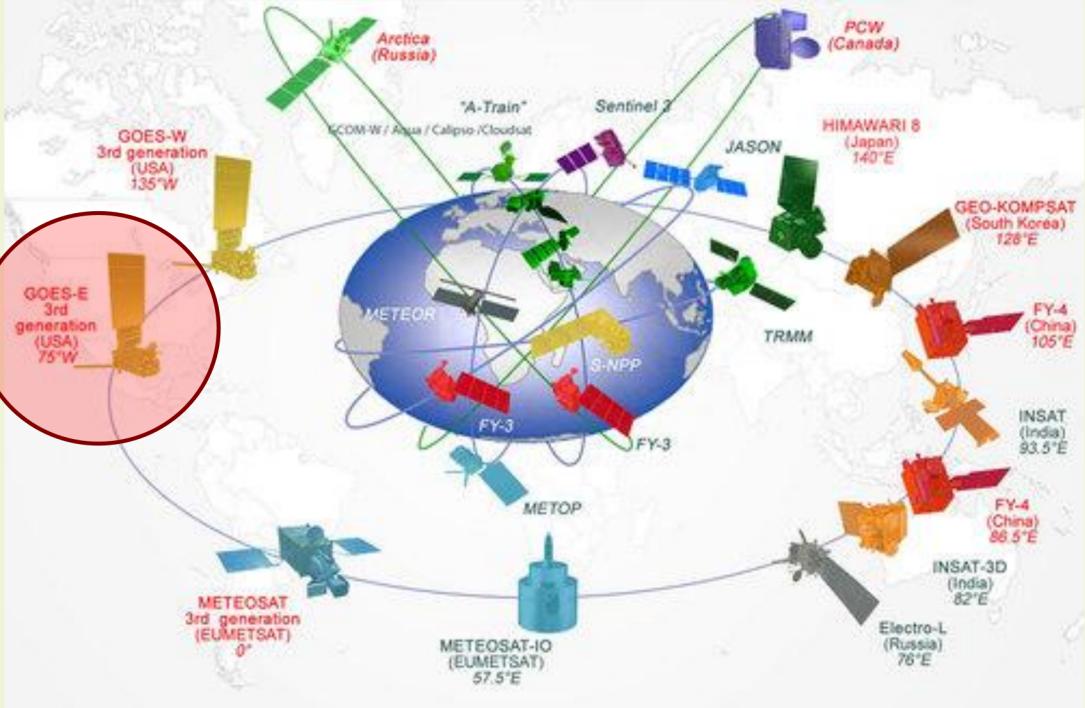


GENERACIÓN

- **IRRADIACIÓN** → POSICIÓN DEL SOL, **NUBOSIDAD**, TURBIDEZ (aerosoles+vapor de agua)
- **TECNOLOGÍA** → SUCIEDAD, SOMBREAMIENTO, PERDIDAS (joule, inversor, etc.)



INFORMACIÓN SATELITAL



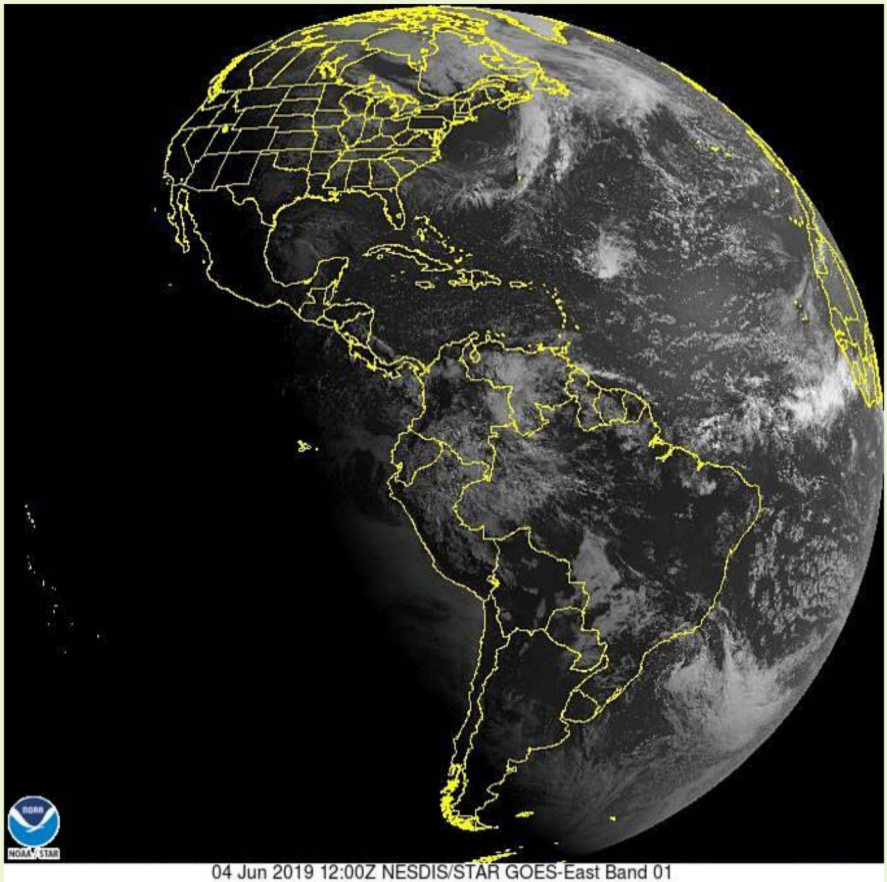
LA IRRADIACIÓN SOLAR ES UN FENÓMENO ALTAMENTE VARIABLE

REQUIERE IMÁGENES CON ALTA CADENCIA TEMPORAL Y RESOLUCIÓN ESPACIAL ADECUADAS

IMAGEN FULL-DISK DEL CANAL VISIBLE (0.47 um)

GOES-EAST
POS: -75°

Δx = 500 m
Δt = 10 mins

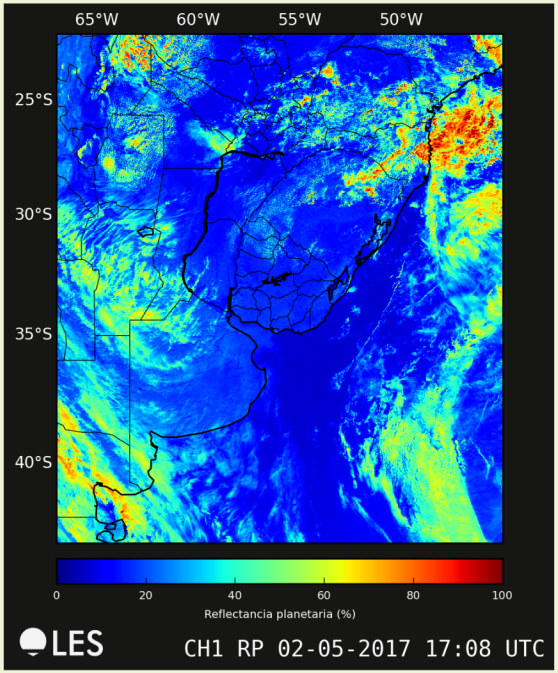


NUBOSIDAD
DIURNA

Medidas en Tierra

relación complementaria

Satélite



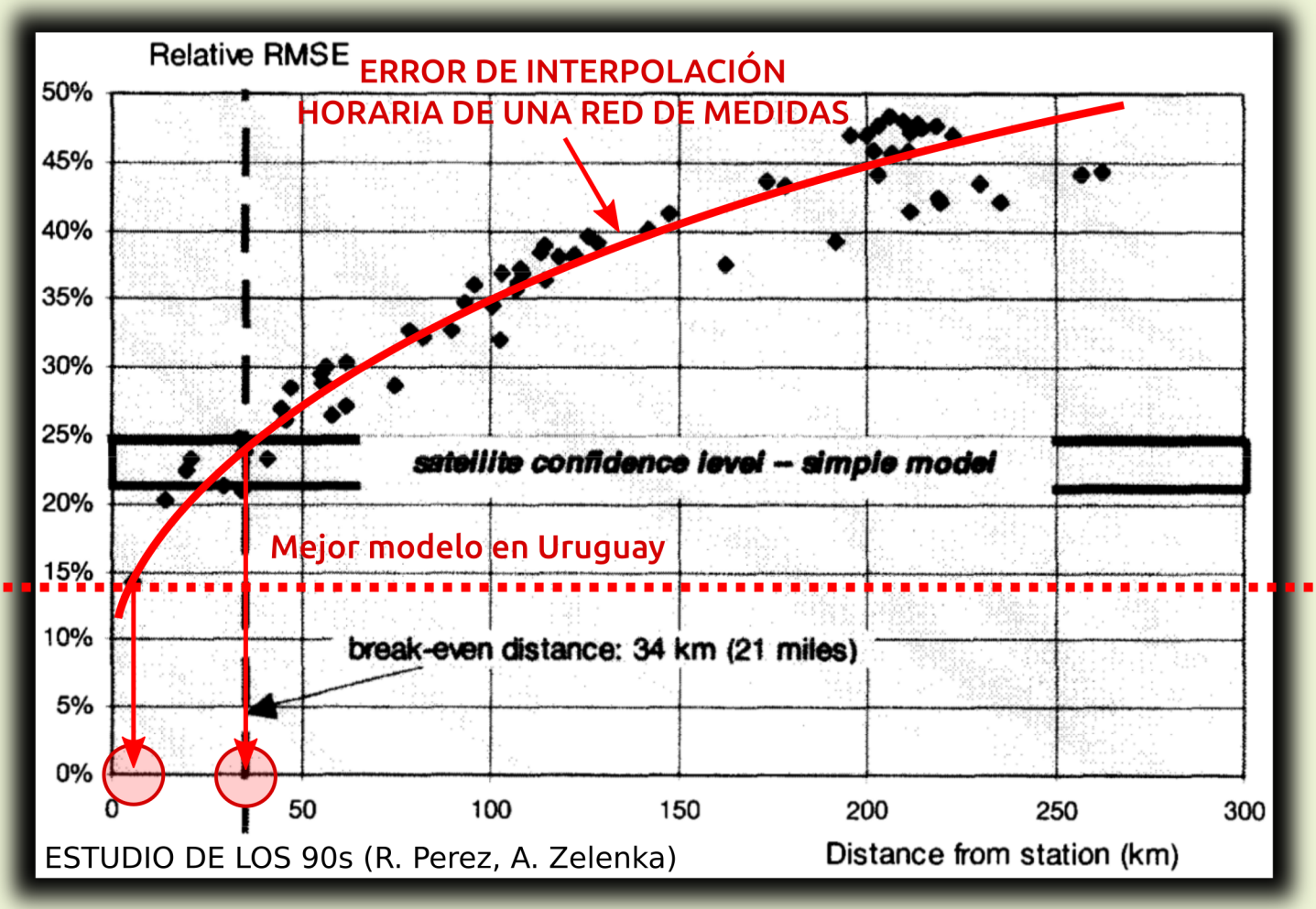
Baja incertidumbre en el sitio específico.

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.


Relative RMSE
ERROR DE INTERPOLACIÓN
HORARIA DE UNA RED DE MEDIDAS
50%
45%
40%
35%
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
satellite confidence level -- simple model
Mejor modelo en Uruguay
break-even distance: 34 km (21 miles)
0
50
100
150
200
250
300
ESTUDIO DE LOS 90s (R. Perez, A. Zelenka)
Distance from station (km)

ESTIMACIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR POR SATÉLITE

MODELOS DE CIELO CLARO

Estimación de Turbidez (aerosoles, agua precipitable)

Estimado por satélites LEO, modelos atmosféricos, medidas (variación diaria, "lenta")

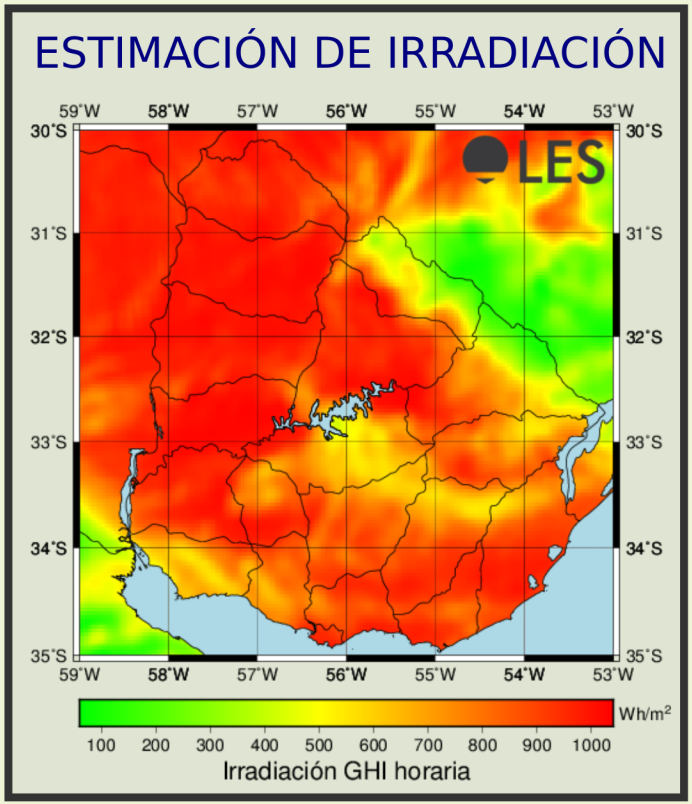
+

NUBOSIDAD POR SATÉLITE

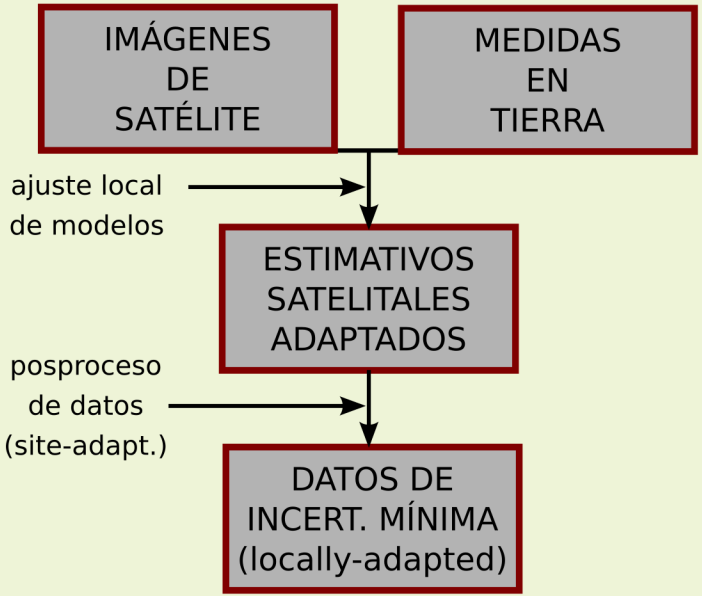
Modelado de la atenuación por nubosidad

Imágenes de satélites GEO (variación minutal, "rápida")

→

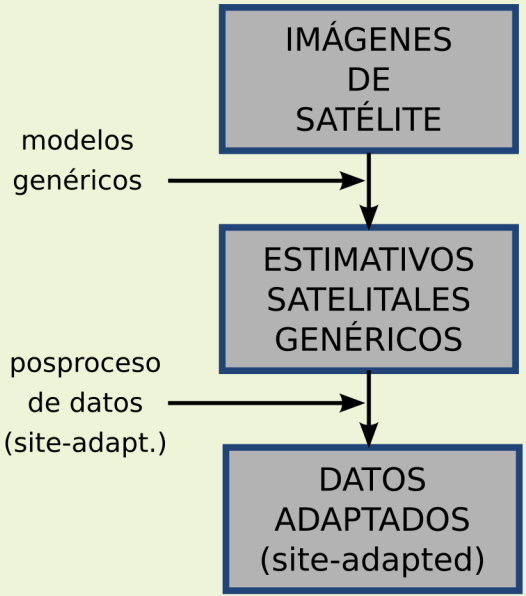


AJUSTE DE MODELOS vs ADAPTACIÓN AL SITIO



Ajuste de modelos a las condiciones meteo regionales utilizando medidas en tierra

Estimación de incertidumbre mínima, alta potencialidad de reducir sesgos y varianza



Posproceso de estimaciones satelitales genéricas utilizando medidas en tierra

Reducen la incertidumbre de la estimación, pero su potencialidad es limitada

MODELOS LOCALMENTE AJUSTADOS VS ADAPTACIÓN AL SITIO

Comparación **horaria** de datos estimados por Heliosat-4 y modelos tipo Cloud Index Models

Modelo Heliosat-4:

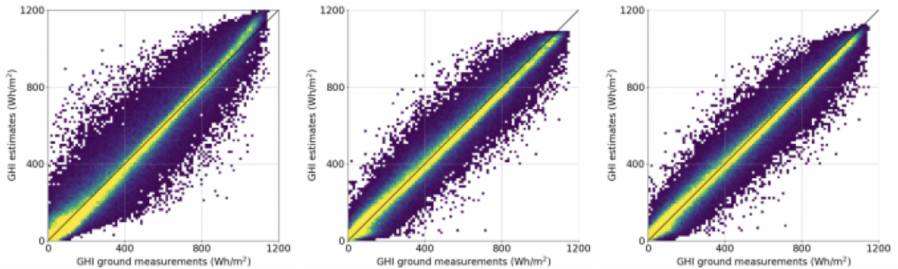
* Modelo de base física a partir de modelos de transferencia radiante
* La versión operacional es un cuadro de varias entradas en función de información satelital y otros.
* Estimativos disponibles en la web del Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, SoDA)
* Evaluación original y con site-adapt.

Modelos CIMs locamente ajustados con dos modelos de cielo claro (sin site-adaptation posterior)

$$G_h = G_h^{csk} \times [a + b(1 - \eta)]$$

model	metric	LE	MS	LU	LB	TT	SA	RO	AR	ZU	TA	all sites
Heliosat-4	rMBD (%)	-1.0	0.6	-3.1	-1.5	0.8	-2.6	2.6	0.2	0.6	1.9	**−0.8**
(original)	rRMSD (%)	17.5	19.4	16.6	17.3	17.8	18.0	20.4	16.8	17.7	17.7	**17.9**
	KSI (Wh/m^2)	22.0	12.8	21.3	16.0	10.1	23.4	11.2	13.6	13.9	12.5	**17.7**
Heliosat-4	rMBD (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**0.0**
(site adapted)	rRMSD (%)	16.0	18.6	15.4	16.4	17.3	16.5	19.6	16.0	16.9	17.0	**16.8**
	KSI (Wh/m^2)	9.5	11.6	10.3	9.5	10.1	9.0	10.6	9.7	8.8	9.0	**10.2**
CIM-ESRA	rMBD (%)	−0.9	−0.9	−1.2	−1.1	−1.2	−1.1	−1.3	−1.1	−1.1	−1.3	**−1.0**
(adjusted T_L)	rRMSD (%)	11.2	14.1	12.3	12.2	13.1	11.8	13.6	11.4	11.9	12.0	**12.5**
	KSI (Wh/m^2)	5.1	6.3	9.3	7.8	9.0	6.5	8.9	6.2	6.6	6.7	**7.0**
CIM-McClear	rMBD (%)	−0.6	−1.2	−1.3	−1.1	−1.3	−1.1	−1.4	−1.0	−1.2	−1.0	**−1.1**
(site adapted)	rRMSD(%)	10.6	13.8	12.1	12.0	12.9	11.3	13.6	11.0	11.5	11.6	**12.1**
	KSI (Wh/m^2)	4.9	9.2	10.8	8.7	10.7	7.9	10.7	7.2	8.5	7.0	**8.4**
measurement average (Wh/m^2)		463	446	465	438	437	469	427	458	440	438	**448**

Table 6: Performance metrics for the all-sky models against ground measurements: original Heliosat-4, site-adapted Heliosat-4, CIM based on ESRA and CIM based on site-adapted McClear. The last column shows the weighted average across sites.



(a) Heliosat4. (b) CIM-ESRA. (c) CIM-McClear.

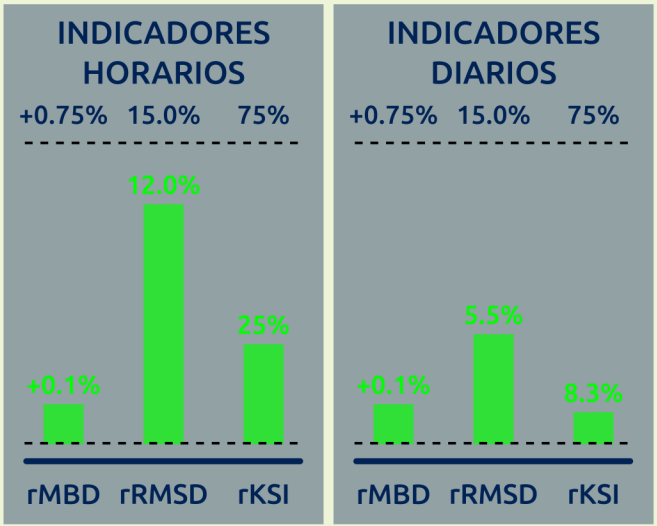
Figure 7: Estimates vs ground measurements for the site adapted Heliosat-4 (left), and the cloud index models based on ESRA (center) and the site adapted McClear (right) for all sites. The colour scale indicate the concentration of the samples in the scatter plot.

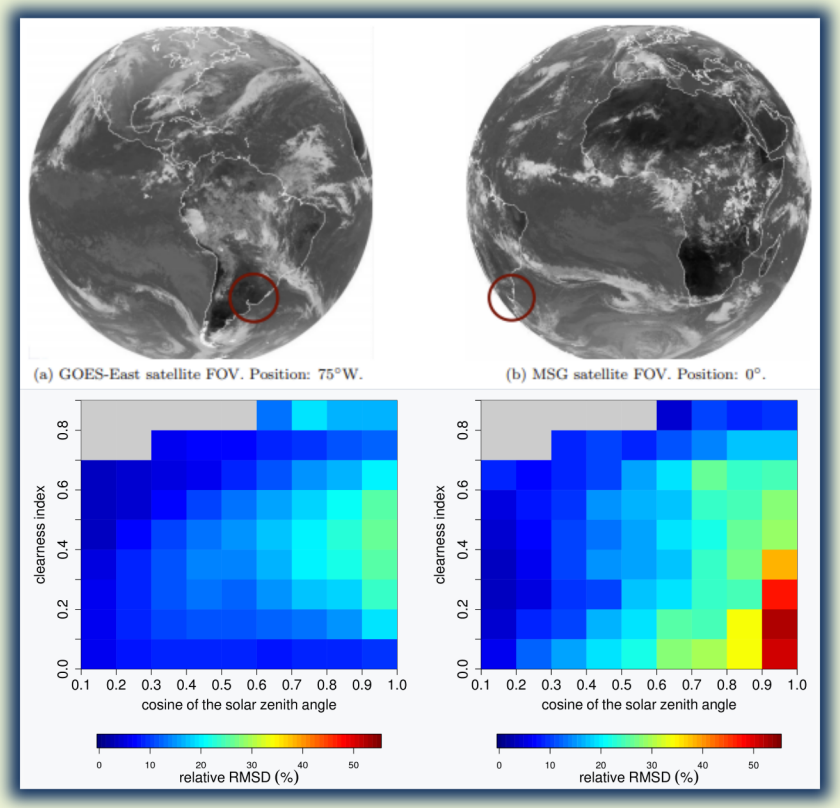
NO TODA INFORMACIÓN SATELITAL ES IGUAL: tipo de satélite, ubicación

¿Qué tipo de información satelital usan?
¿Qué satélite geoestacionario usan?

COMPARACIÓN DE MODELOS EN LA REGIÓN UTILIZANDO EL SATÉLITE GOES-EAST (Americas) Y SATÉLITE METEOSAT (Europa)

DESEMPEÑO EN LA PAMPA HÚMEDA



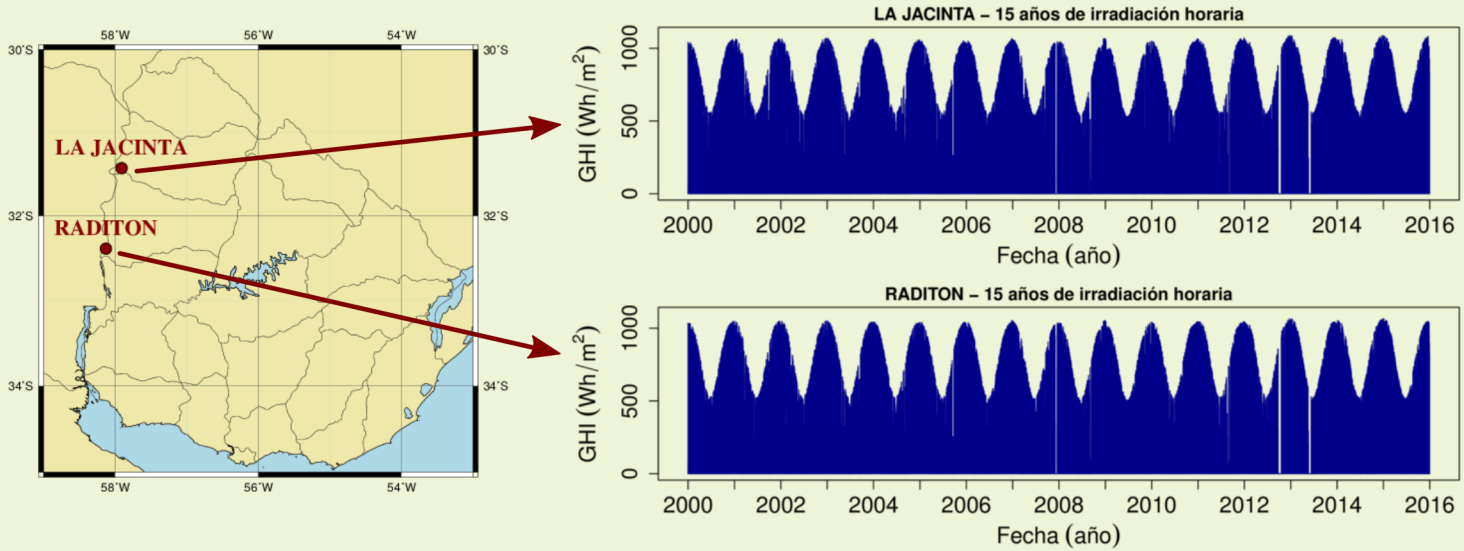


APLICACIÓN DEL MODELO SATELITAL

PERMITEN ESTIMAR RADIACIÓN SOLAR EN SITIOS ESPECÍFICOS DONDE NO HAY MEDIDAS

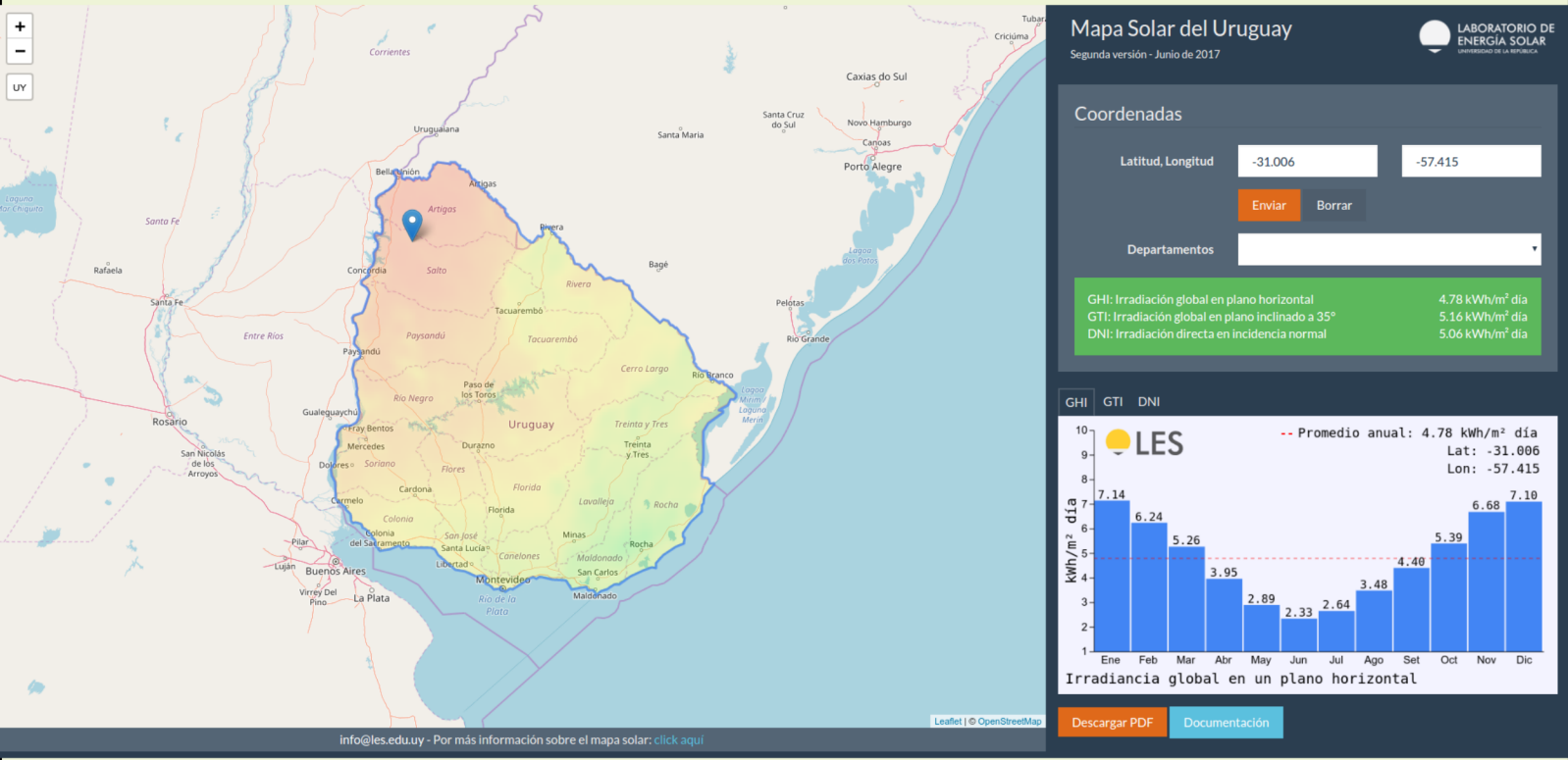
PERMITEN ESTIMAR SERIES DE DATOS HISTÓRICAS O AD-HOC

LOS MODELOS PERMITEN ESTIMAR LA IRRADIACIÓN SOLAR HORARIA O INTRA-HORA PARA CUALQUIER PUNTO DE UN TERRITORIO (RESOLUCIÓN DE ~1-2 km)



MAPA SOLAR DEL URUGUAY
(versión 2, 2017)

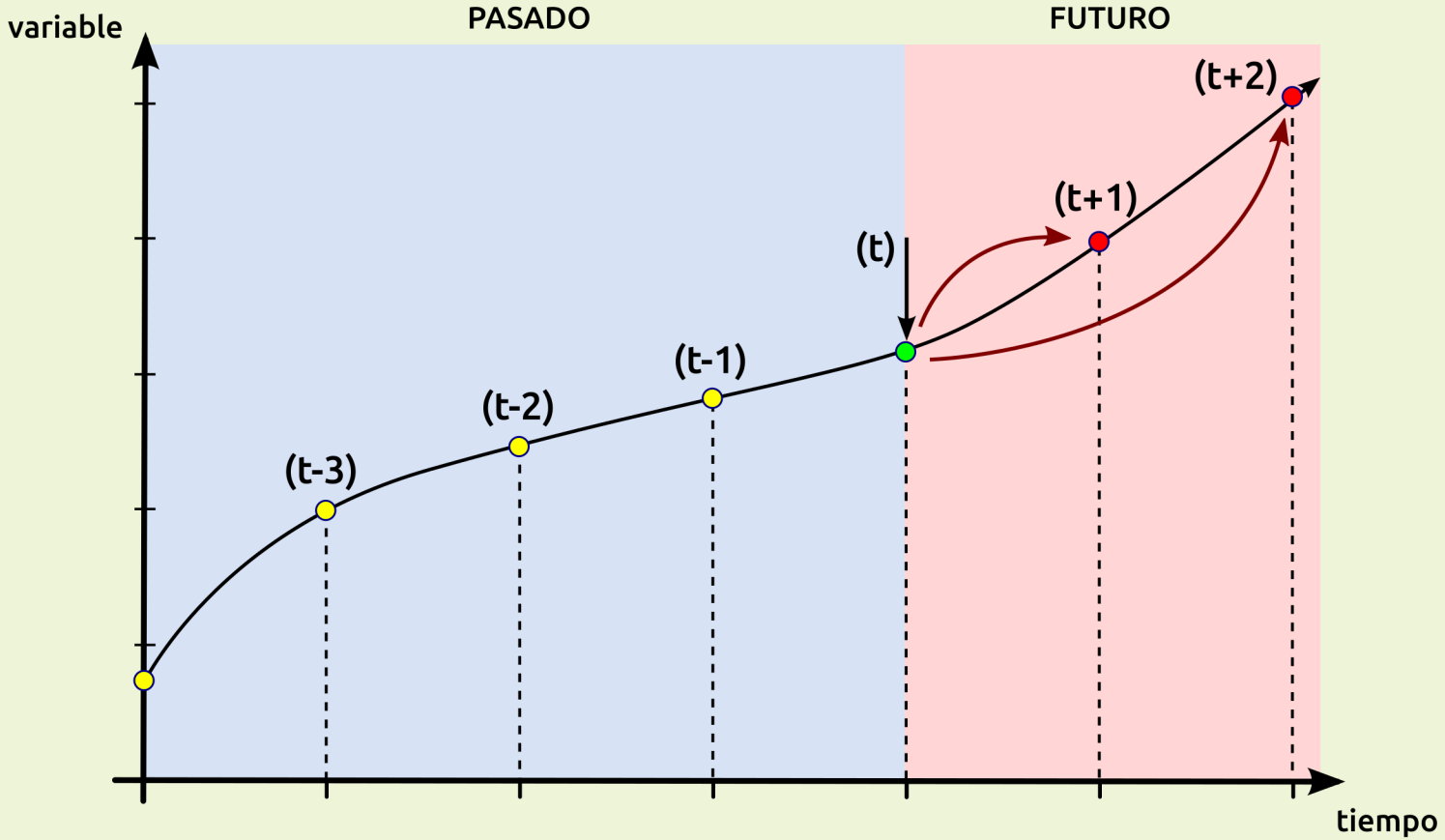
HERRAMIENTA ONLINE



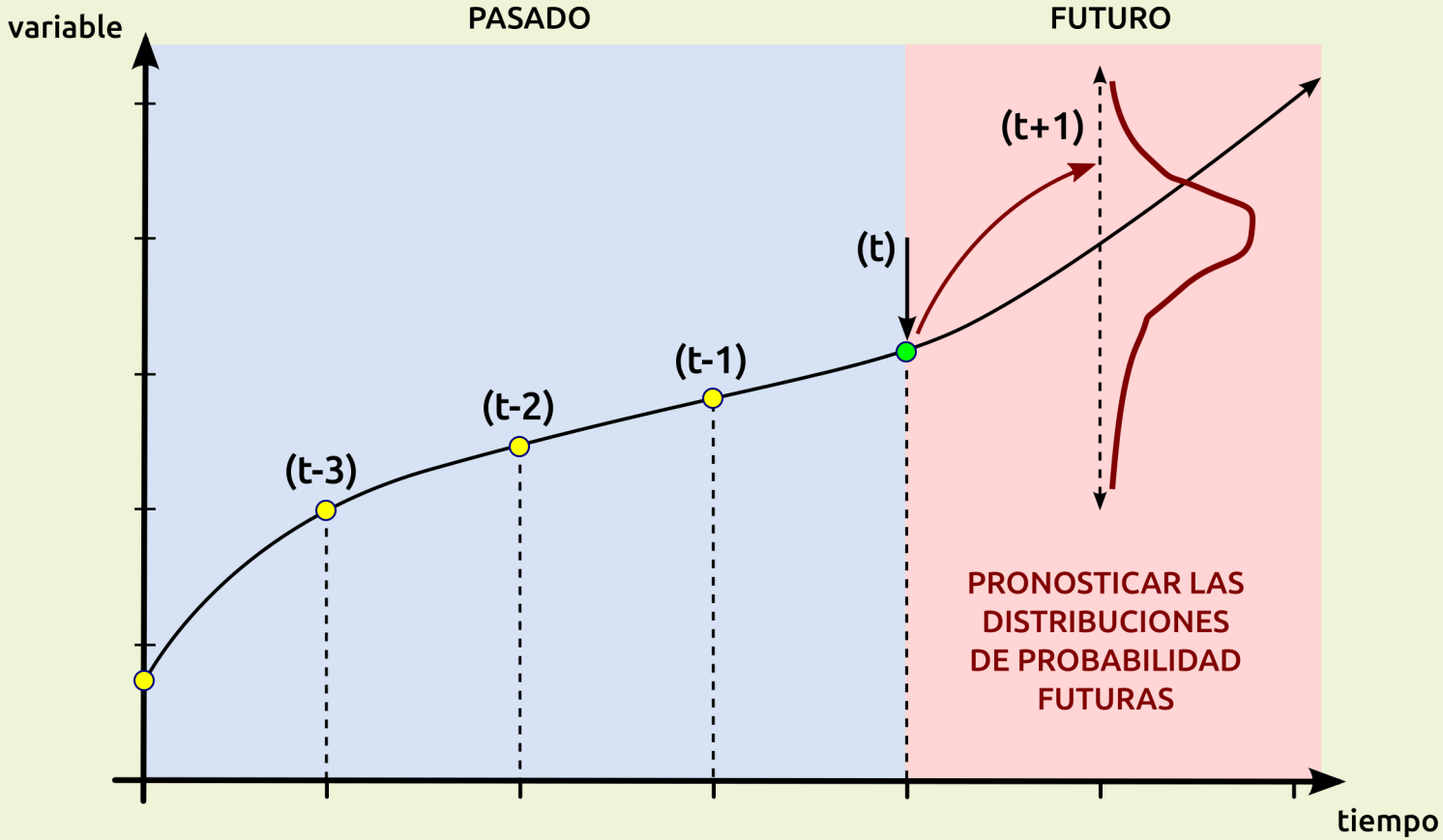
http://les.edu.uy/online/msuv2/

PRONÓSTICO DEL RECURSO SOLAR

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA: PRONÓSTICO DETERMINÍSTICO (puntual)



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA: PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO



¿POR QUÉ PRONOSTICAR A CORTO PLAZO?

DESPACHO EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA
(disminuir los costos en el despacho de la energía eléctrica y en la operación de reservas)

REDUCIR LA INCERTIDUMBRE EN LA VALORIZACIÓN DEL RECURSO
(permite fijar precios y cantidades de venta con menor incertidumbre)

ANTICIPAR PAQUETES DE ENERGÍA PARA EXPORTACIÓN
(especialmente importante en Uruguay)

MODELOS NUMÉRICOS DE ATMÓSFERA

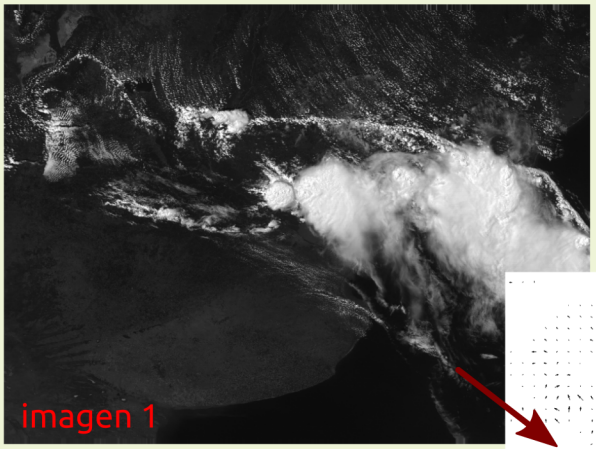
Resuelven numéricamente las ecuaciones físicas de los procesos que ocurren en la atmósfera

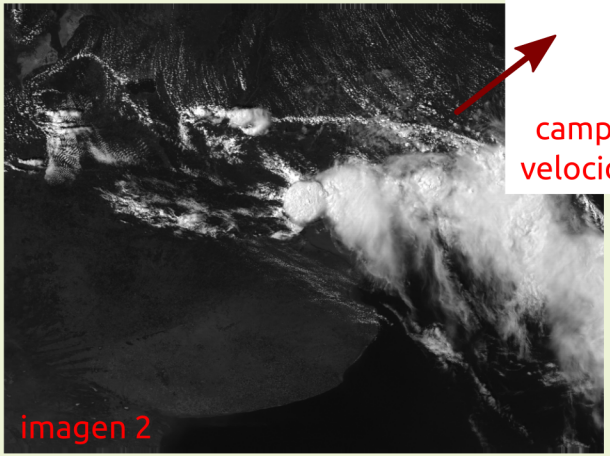
Dependiendo de la escala, aplican distintas simplificaciones en las ecuaciones generales

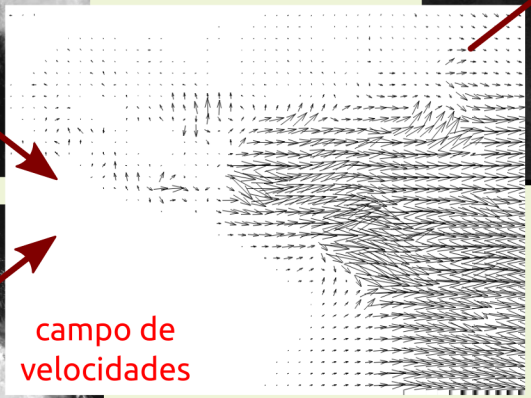
El sistema requiere de condiciones iniciales y de borde para su resolución

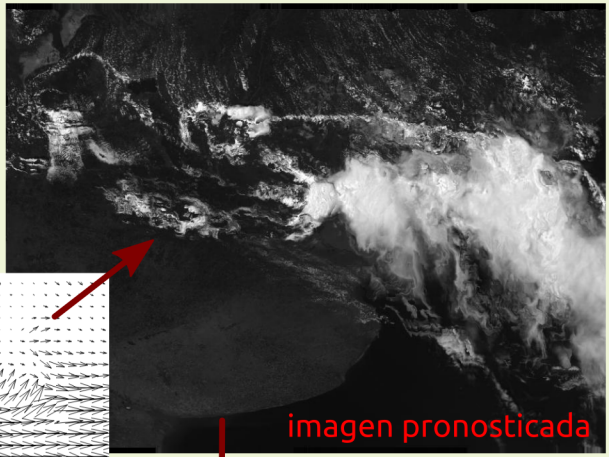
Requieren un alto poder de cómputo (especialmente para extender áreas o aumentar la resolución)

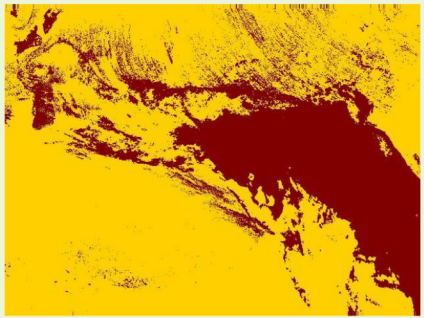
PRONÓSTICO POR SATÉLITE











pronóstico solar

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

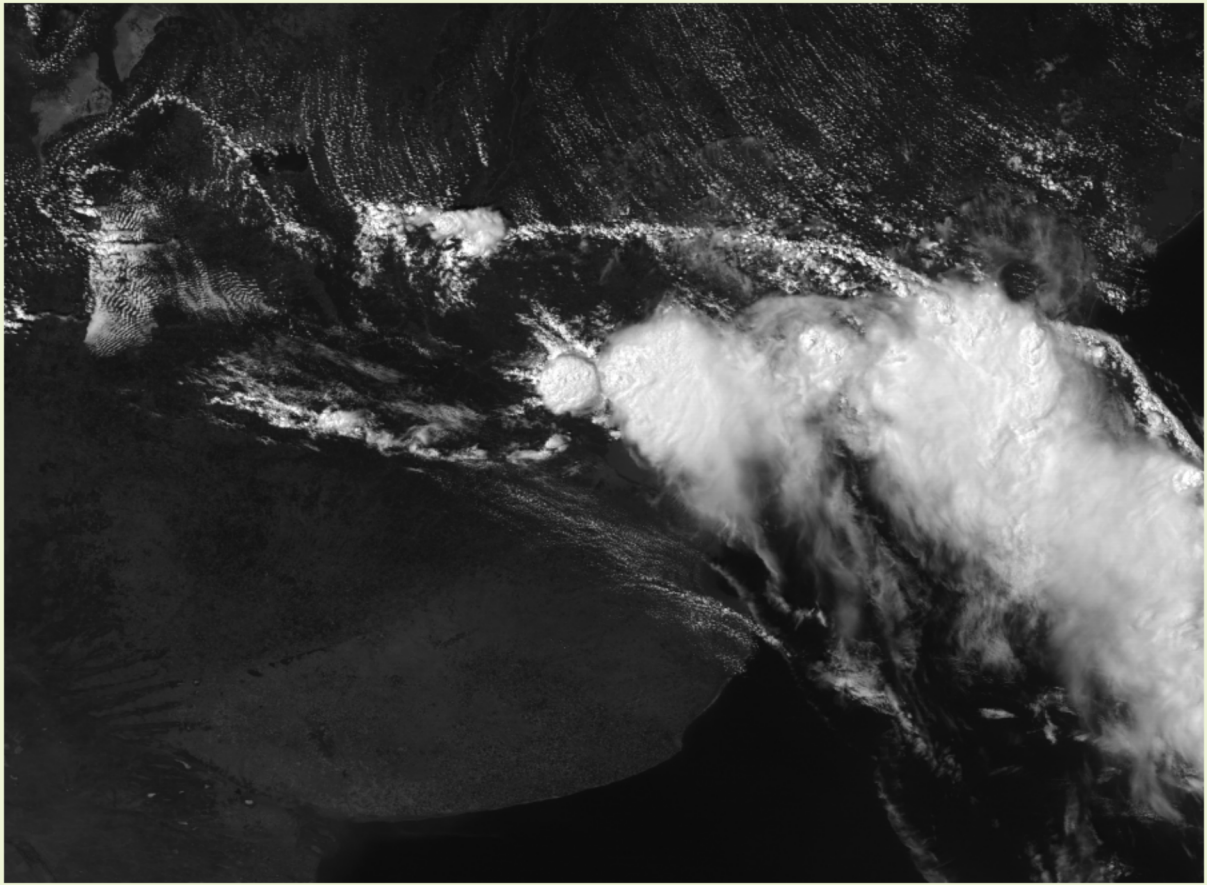


IMAGEN 1

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

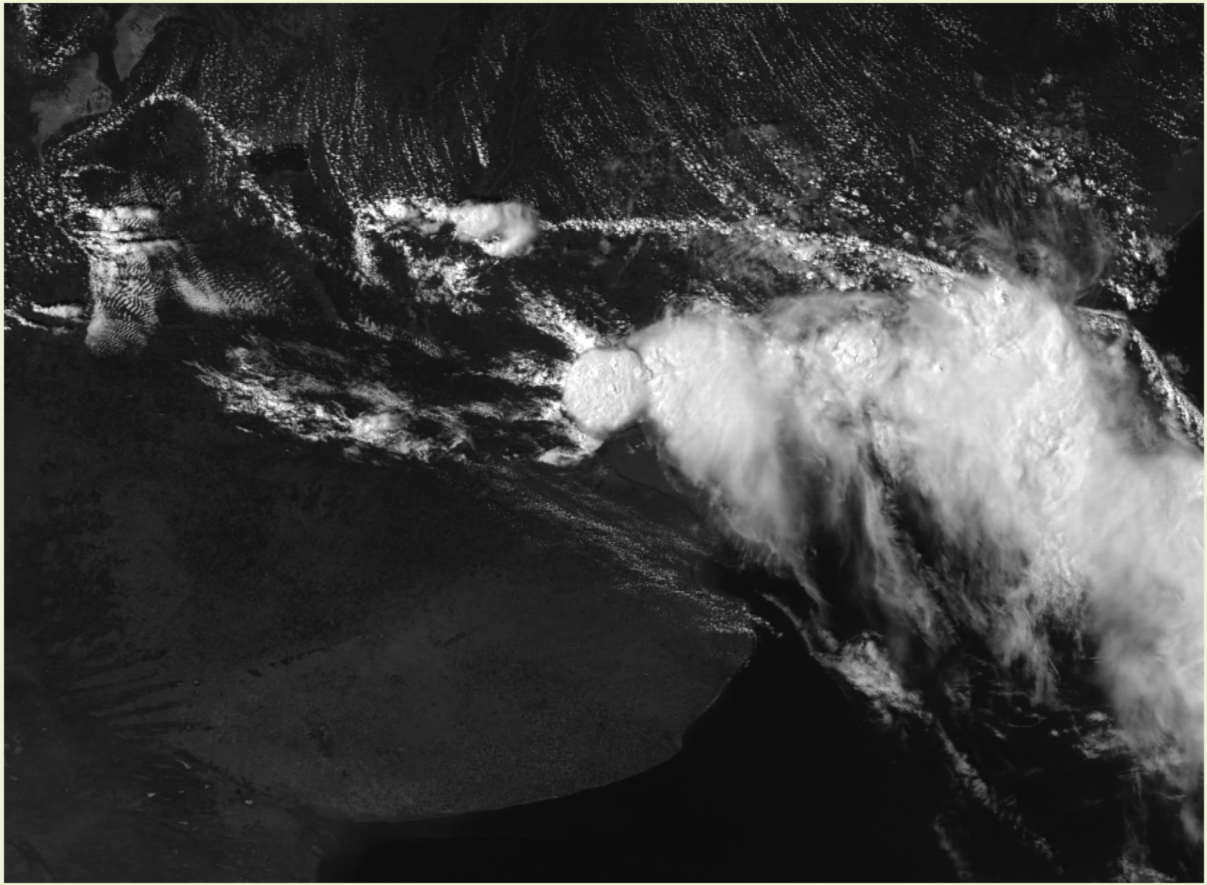


IMAGEN 2

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

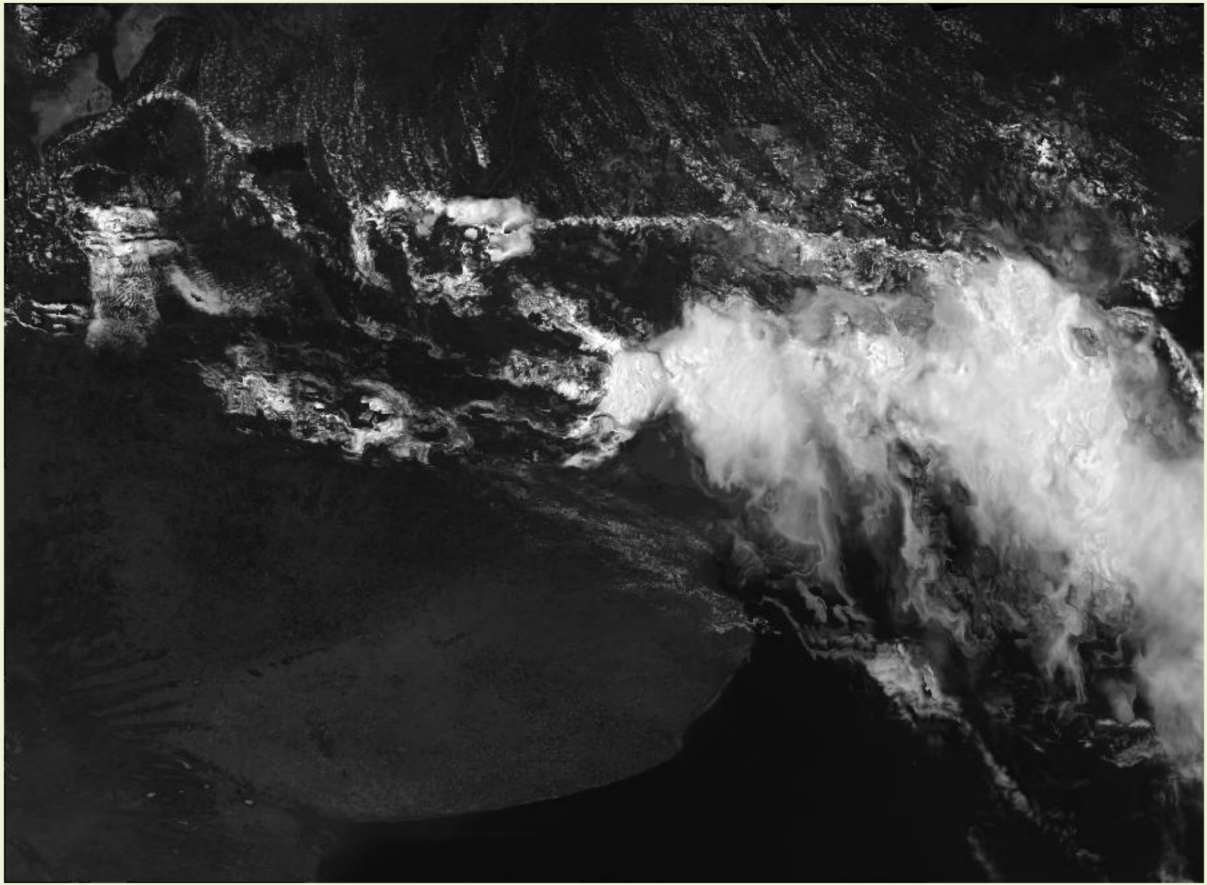


IMAGEN PRONO.

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

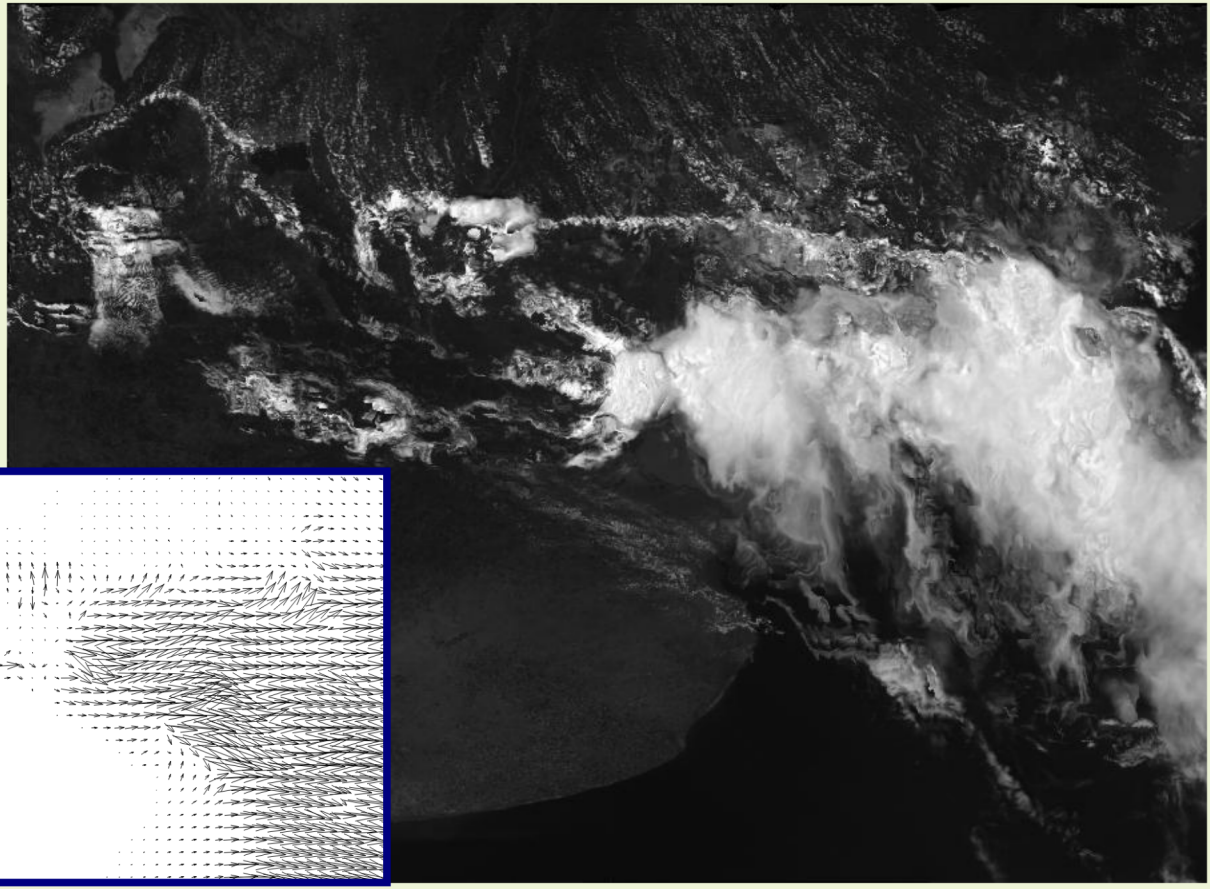
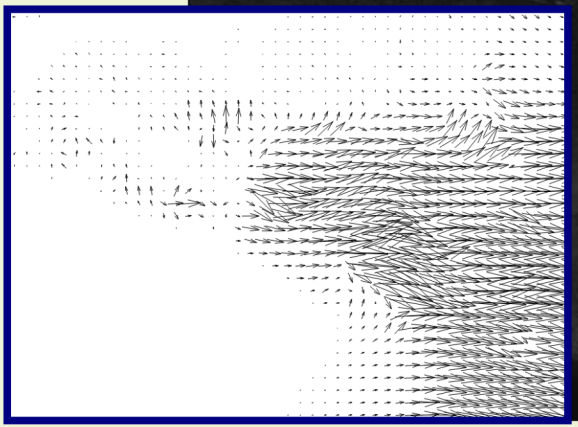


IMAGEN PRONO.



EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

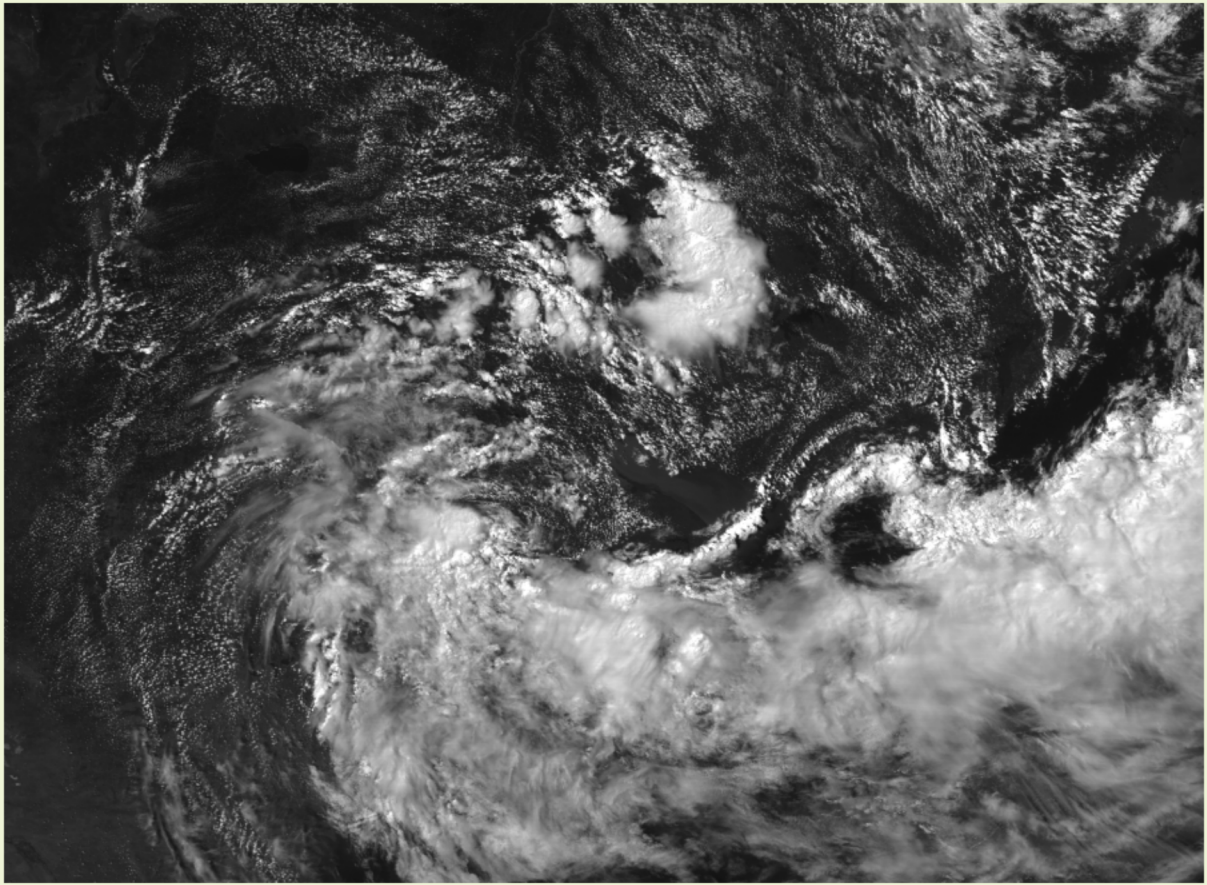


IMAGEN 1

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

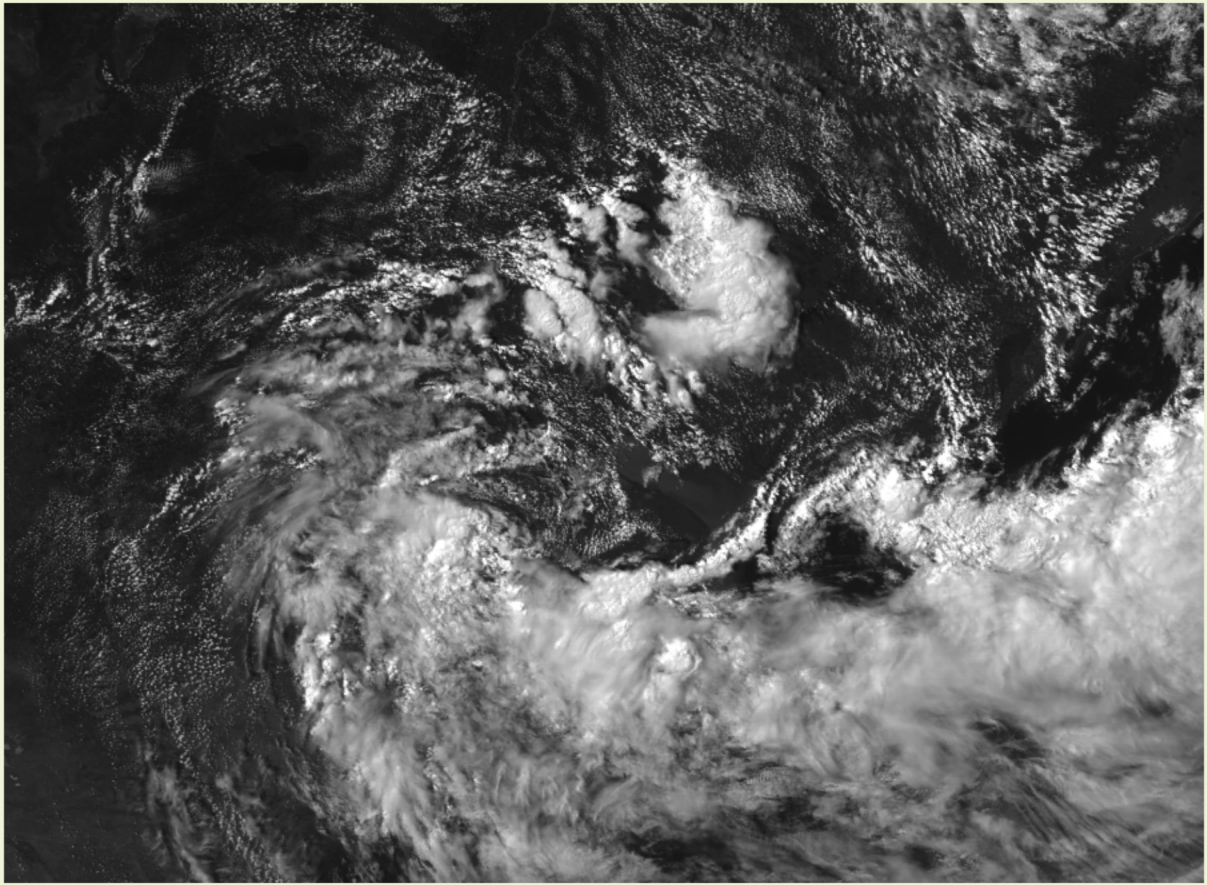


IMAGEN 2

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

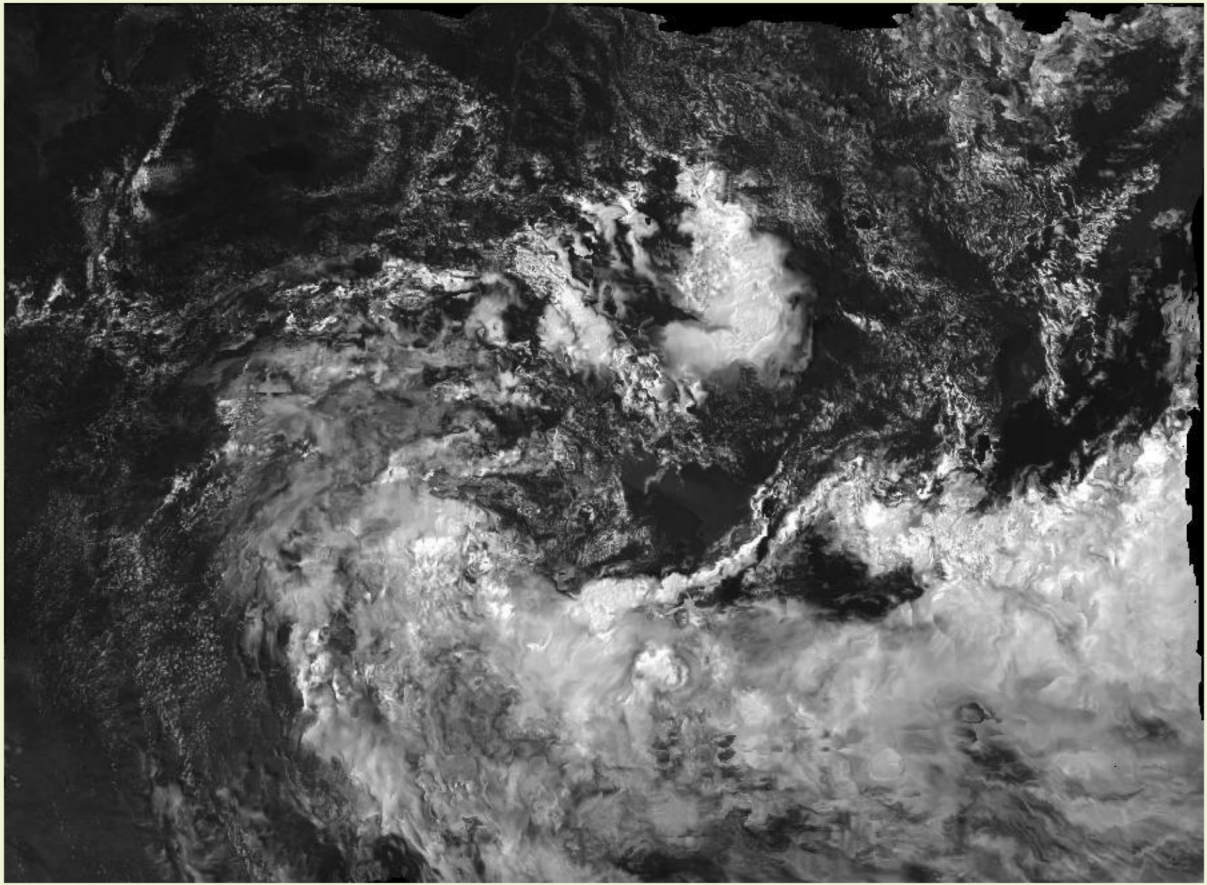


IMAGEN PRONO.

EJEMPLO DE PRONÓSTICO POR SATÉLITE

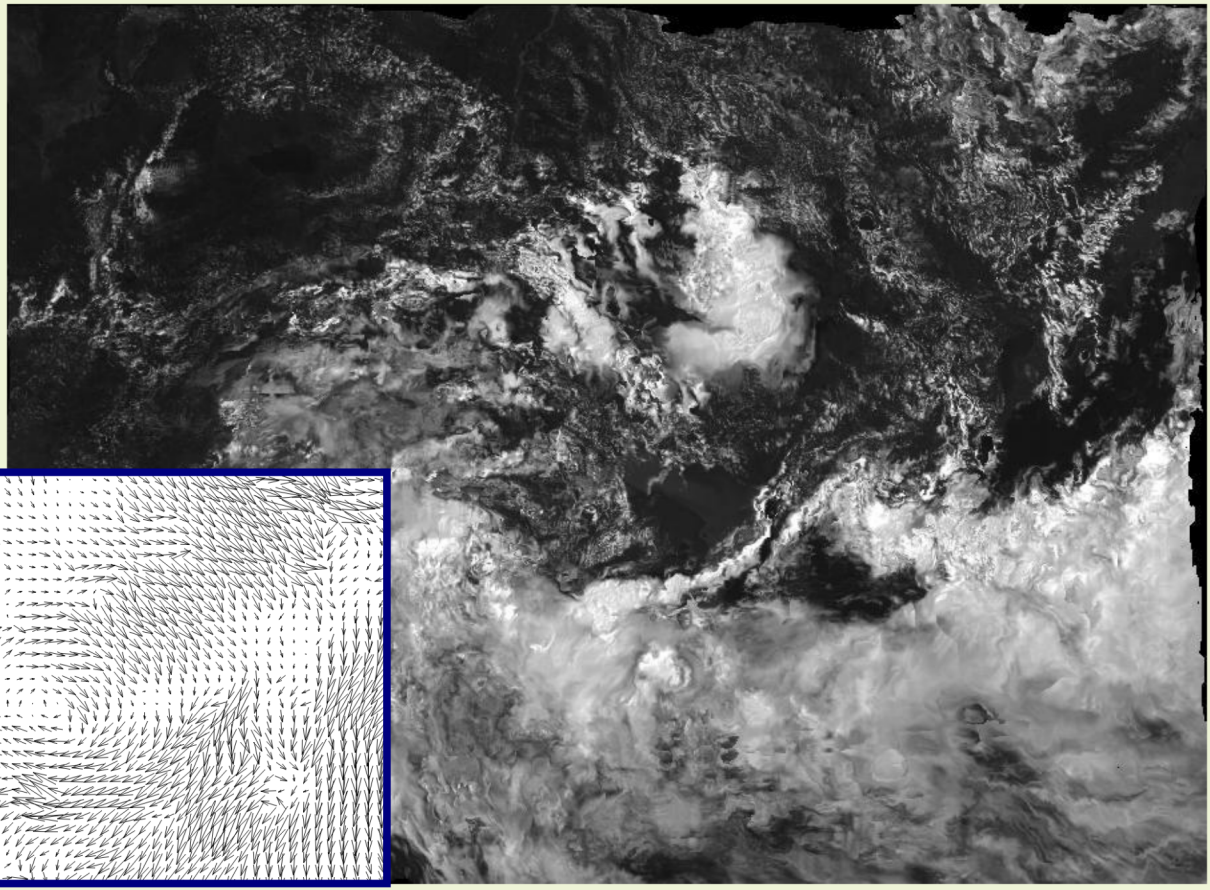
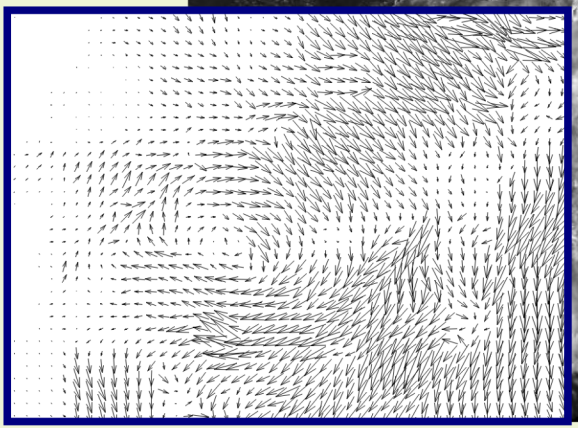


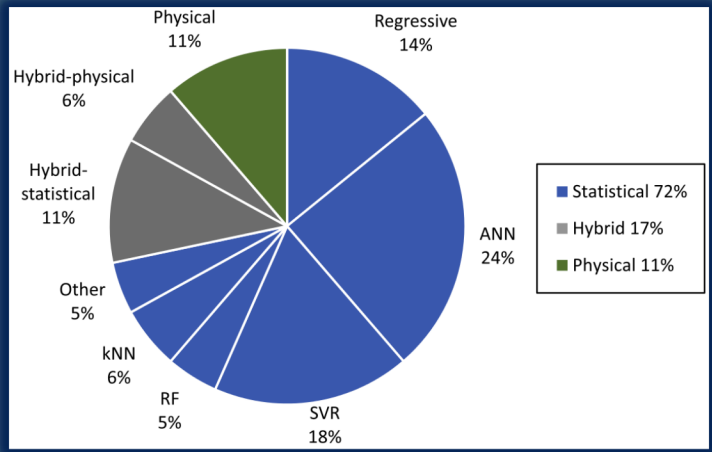
IMAGEN PRONO.



PRONÓSTICO POR SERIES TEMPORALES

Aplicación de técnicas de aprendizaje automático (ML, IA) al pronóstico.

Dependiendo de las entradas utilizadas pueden actuar como:



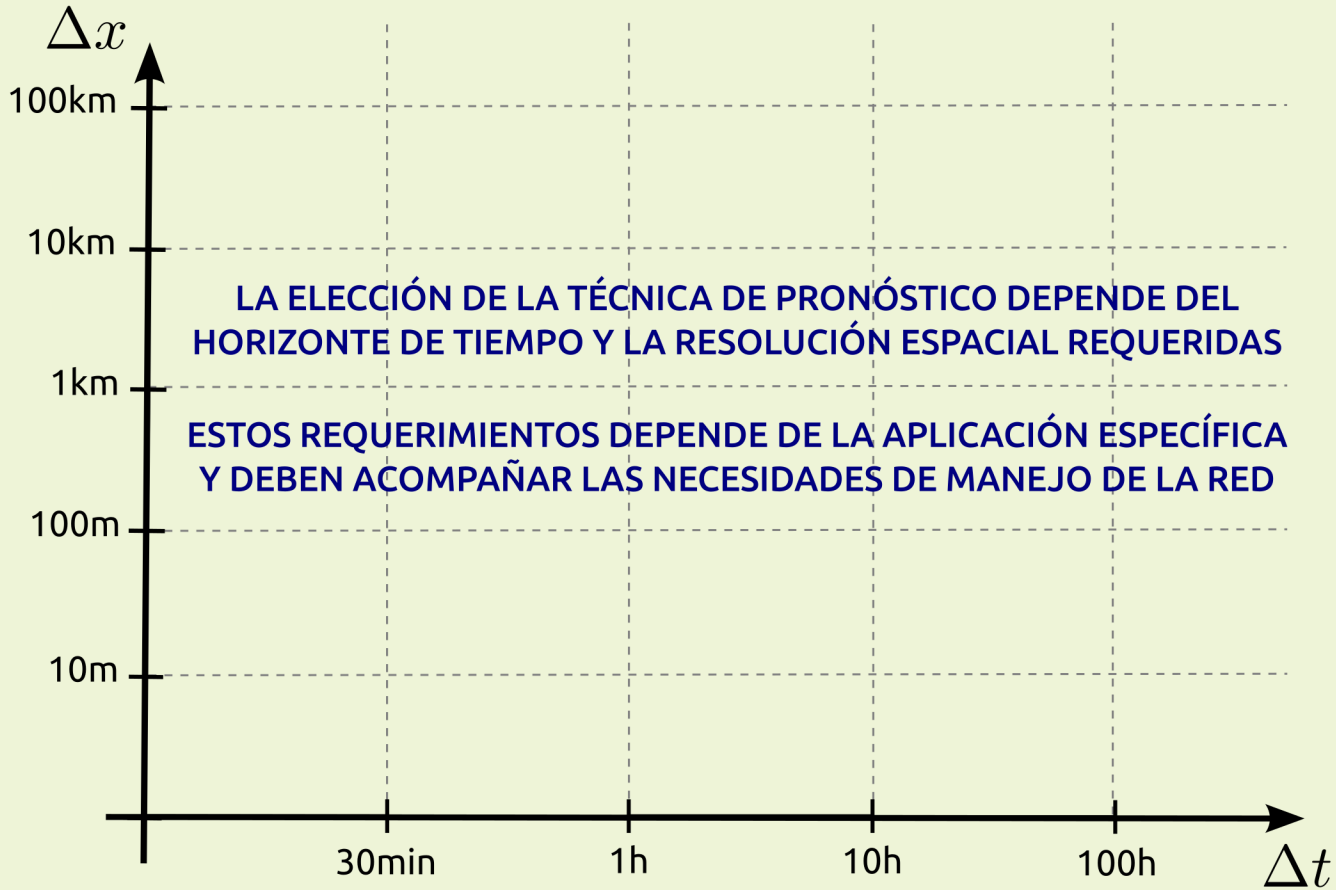
Técnica de pronóstico:
Datos disponibles a tiempo (t)

Posproceso de pronóstico:
Datos disponibles a tiempo (t) + Pronóstico disponible a tiempo (t)

Integración de técnicas:
Datos disponibles a tiempo (t) + varios pronósticos disponibles a tiempo (t)

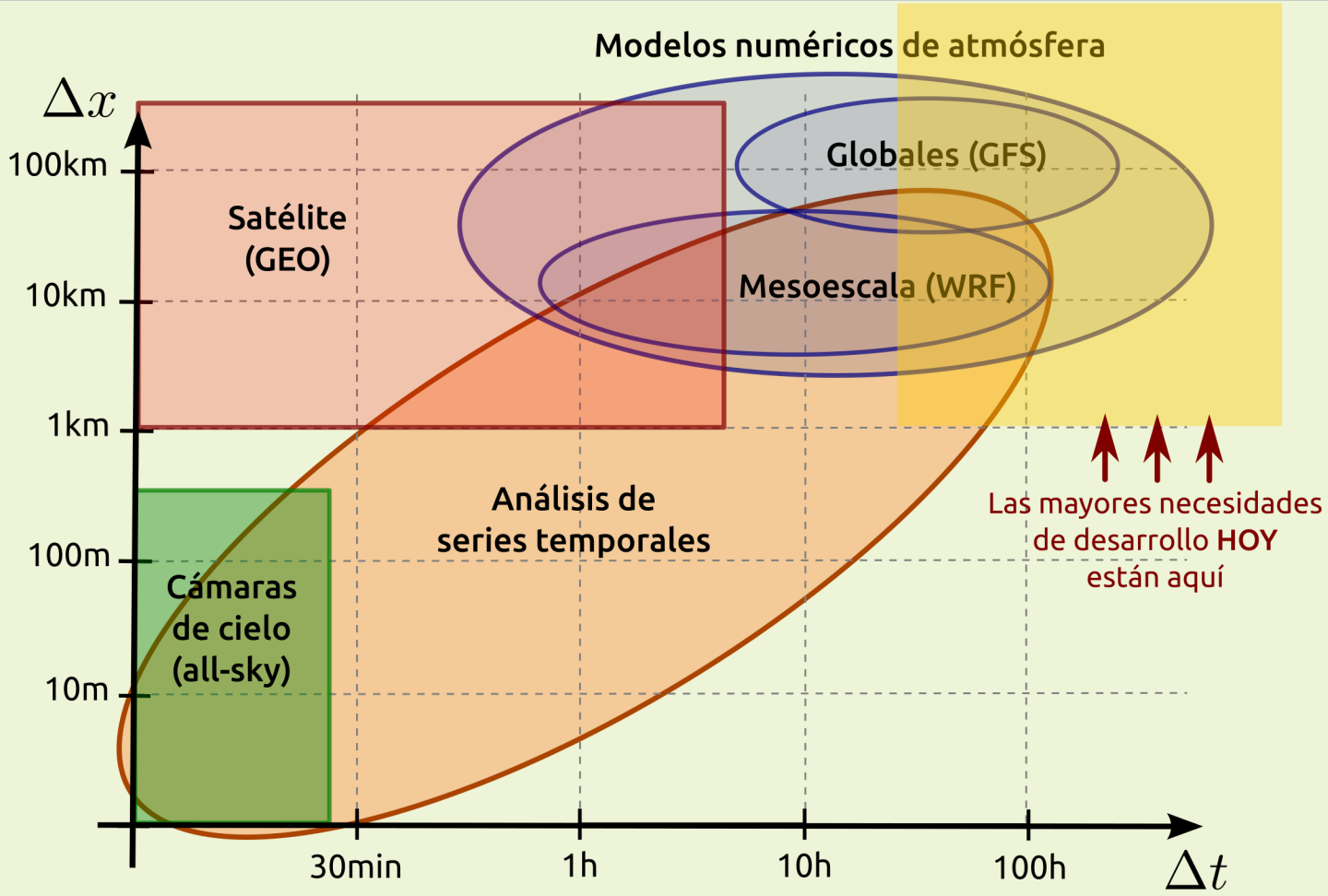
SIN VARIABLES EXÓGENAS

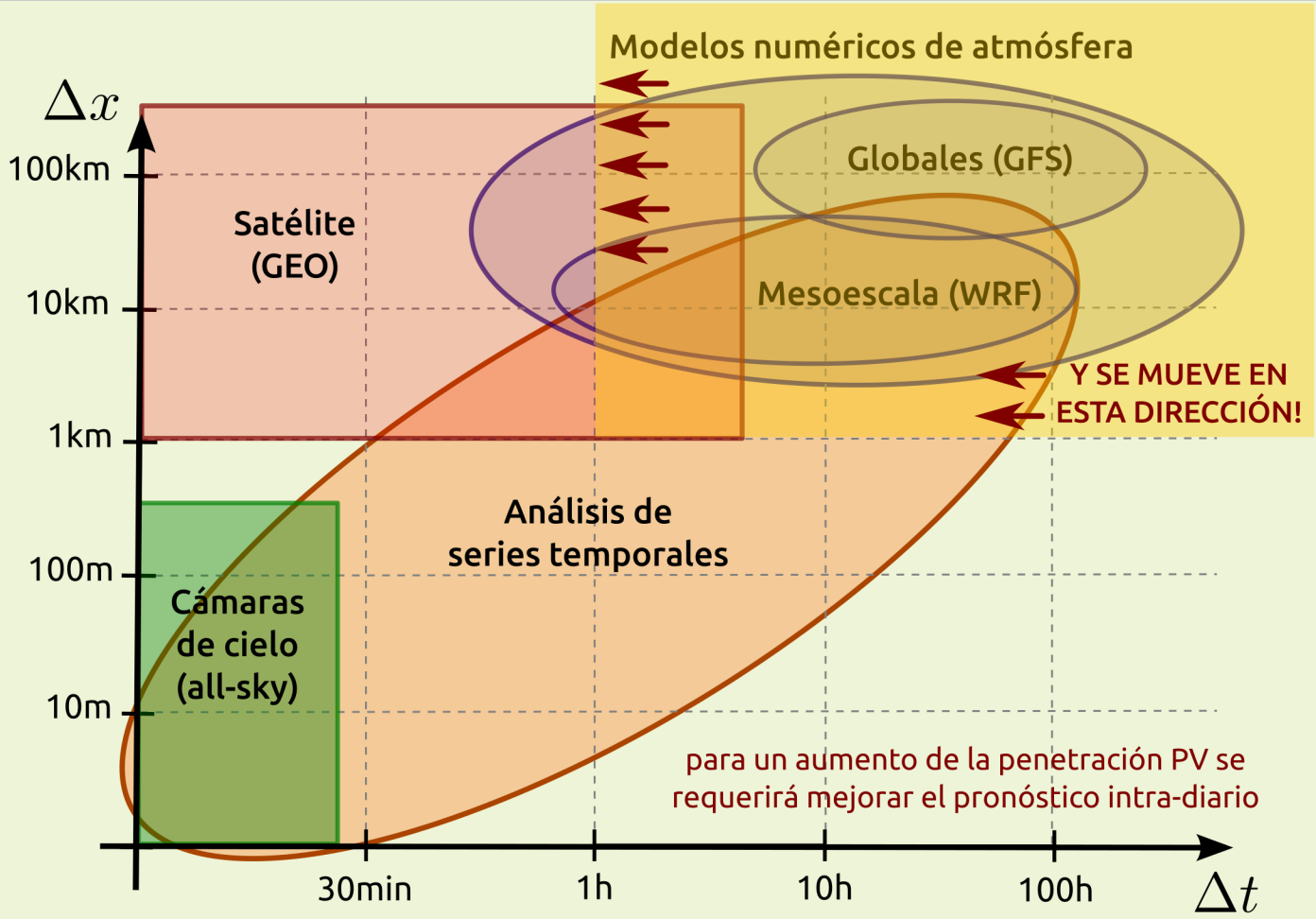
CON VARIABLES EXÓGENAS



LA ELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE PRONÓSTICO DEPENDE DEL HORIZONTE DE TIEMPO Y LA RESOLUCIÓN ESPACIAL REQUERIDAS

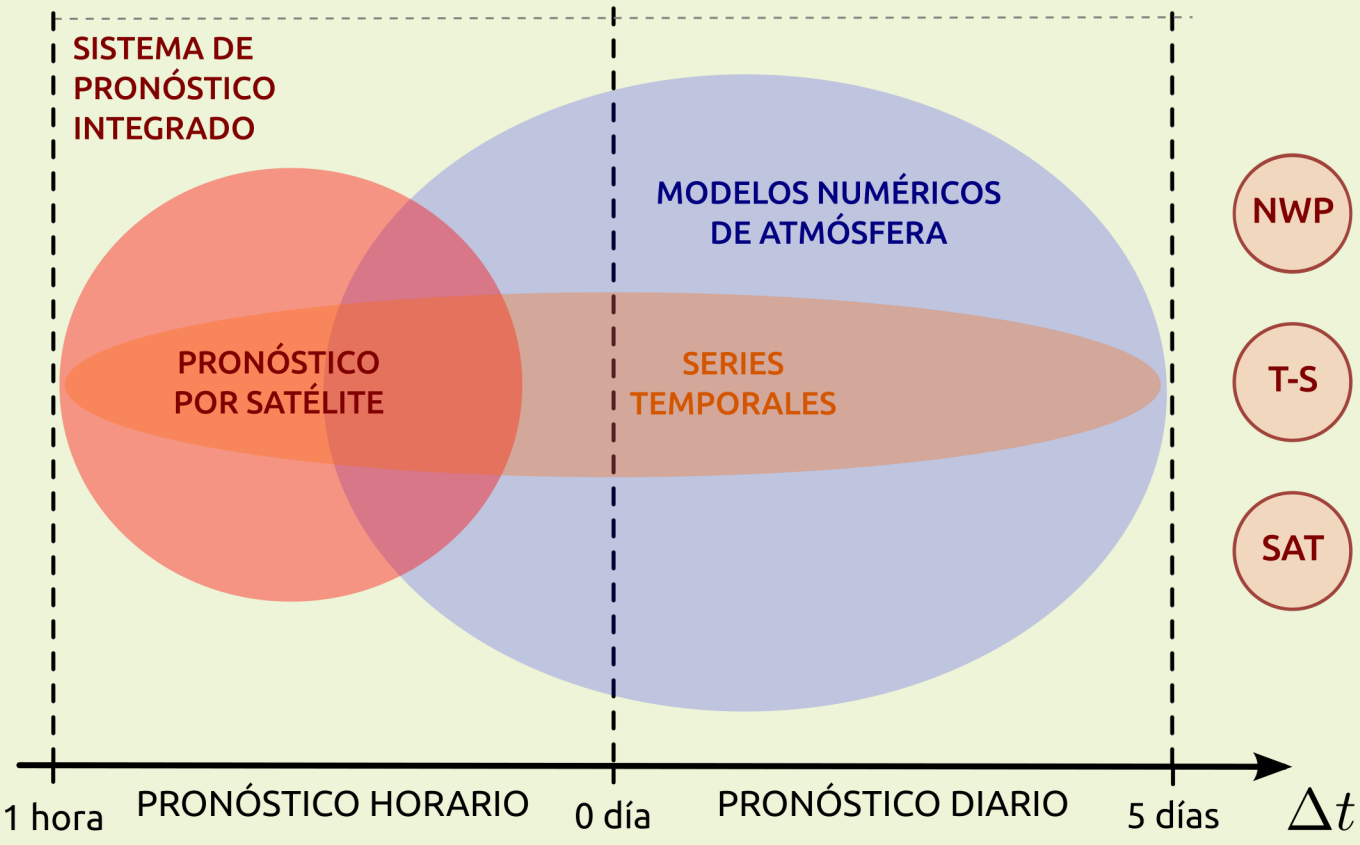
ESTOS REQUERIMIENTOS DEPENDE DE LA APLICACIÓN ESPECÍFICA Y DEBEN ACOMPAÑAR LAS NECESIDADES DE MANEJO DE LA RED


Modelos numéricos de atmósfera
Δx
100km
10km
1km
100m
10m
Satélite (GEO)
Globales (GFS)
Mesoescala (WRF)
Análisis de series temporales
Cámaras de cielo (all-sky)
Las mayores necesidades de desarrollo HOY están aquí
30min
1h
10h
100h
Δt


Modelos numéricos de atmósfera
Δx
100km
10km
1km
100m
10m
Satélite
(GEO)
Globales (GFS)
Mesoescala (WRF)
Y SE MUEVE EN
ESTA DIRECCIÓN!
Análisis de
series temporales
Cámaras
de cielo
(all-sky)
para un aumento de la penetración PV se
requerirá mejorar el pronóstico intra-diario
30min
1h
10h
100h
Δt

HOJA DE RUTA DE DESARROLLO DEL PRONÓSTICO SOLAR

MEDIANO PLAZO (~2 años)



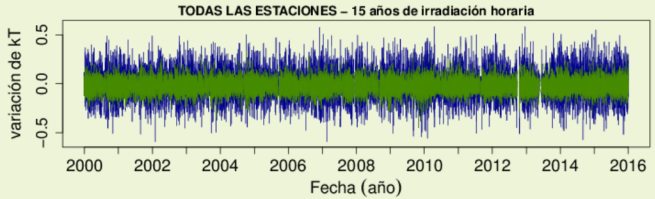
DESARROLLOS ACTUALES

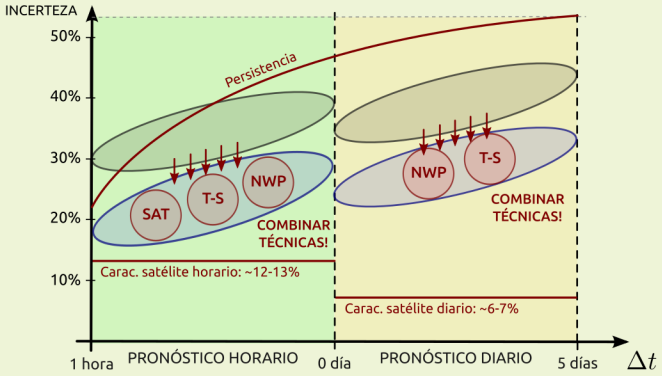
TRABAJO ACTUAL

LINEAS DE TRABAJO EN RELACIÓN A LA GENERACIÓN PV EN URUGUAY

CARACTERIZAR LA VARIABILIDAD DE CORTO PLAZO EN URUGUAY
(minutal, 10-minutal, horaria)

REDUCIR LA INCERTEZA DEL PRONÓSTICO SOLAR
predicción por satélite
integración con NWP y ML





MEJORAR LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN SATELITAL (GHI, DNI y GTI).

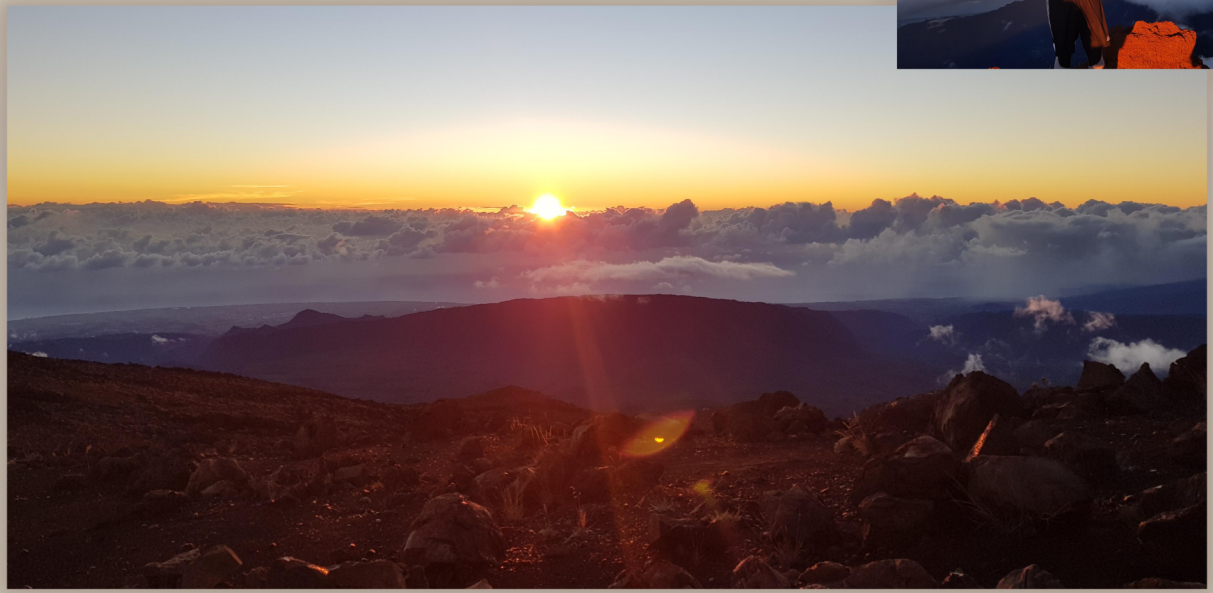
SET COMPLETO DE TÉCNICAS DE PREDICCIÓN: NWP, satelite, camaras todo-cielo, series temporales.

PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO: (en colaboración con P. Lauret y M. David del Lab. PIMENT).

AMPLIAR EL USO DE LA INFORMACIÓN SATELITAL: clasificación de nubes, niebla, hidroestimadores.

DESDE 2018 AMPLIAMOS A TODO EL CONTINENTE AMERICANO

Muchas gracias por su atención!



LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

http://les.edu.uy/
http://les.edu.uy/online/
http://les.edu.uy/cursos/

Rodrigo Alonso Suárez
r.alonso.suarez@gmail.com
@ralonsosuarez