



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología

# Predicción inmediata y a muy corto plazo de la radiación solar a partir de datos de satélite y modelos numéricos

Antonio Rodríguez Martínez, Mauri Martínez Sánchez  
Área de Innovación de AEMet

Madrid

11 de noviembre de 2016

[arodriguezm@aemet.es](mailto:arodriguezm@aemet.es)

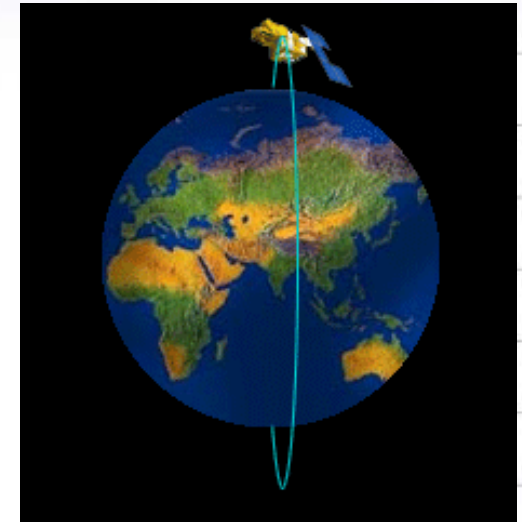
- Satélites meteorológicos y SAFNWC
- Predicción de la Radiación solar con satélites
  - Introducción: rangos de predicción, variables, modelos clásicos
  - Modelo de Nowcasting de AEMET:  
Metodología, calibración y validación
- Modelos numéricos → HARMONIE
- Radiación según HARMONIE: primeros resultados
- Conclusiones y trabajo futuro

# Principales tipos de orbitas utilizadas en Meteorología → Satélites polares heliosíncronos y geostacionarios

Órbita polar heliosíncrona:

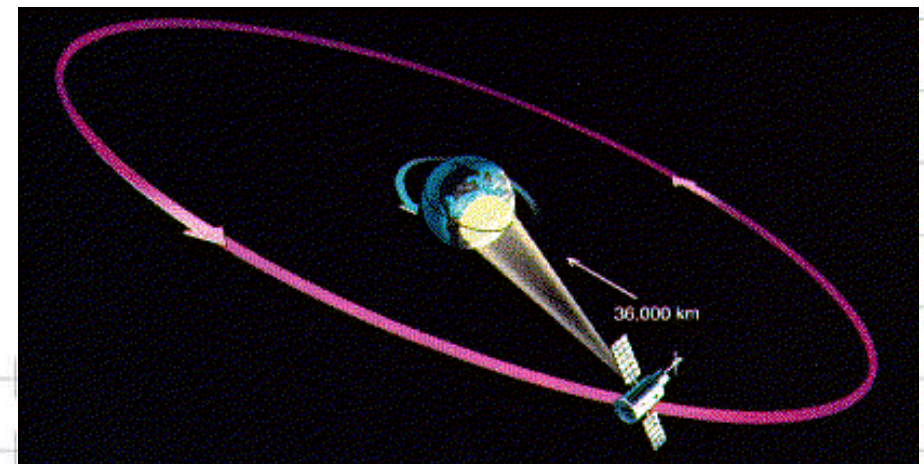
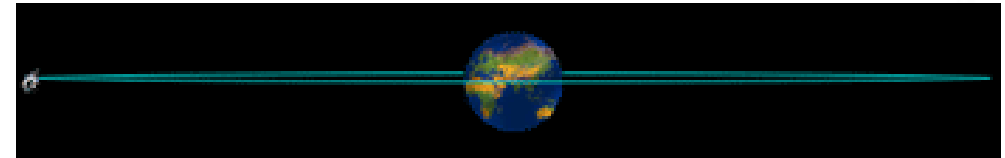
**Ángulo sol-tierra-satélite constante** → el satélite cruza el ecuador a la misma hora local cada día.

Los satélites de órbita polar rodean la Tierra a una altitud típica de 850 km de norte a sur o viceversa, pasando muy cerca de los polos en su vuelo.



Órbita geosíncrona → el satélite orbita a 36000 km con la **misma velocidad angular que la Tierra con inclinación y excentricidad cero.**

Debido a su órbita aparecen como fijos sobre el ecuador y barren siempre un área constante.



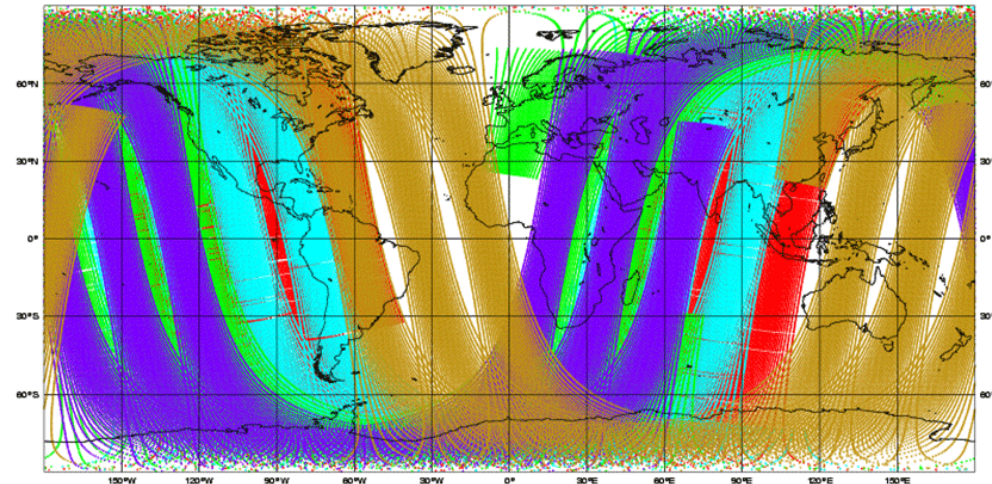
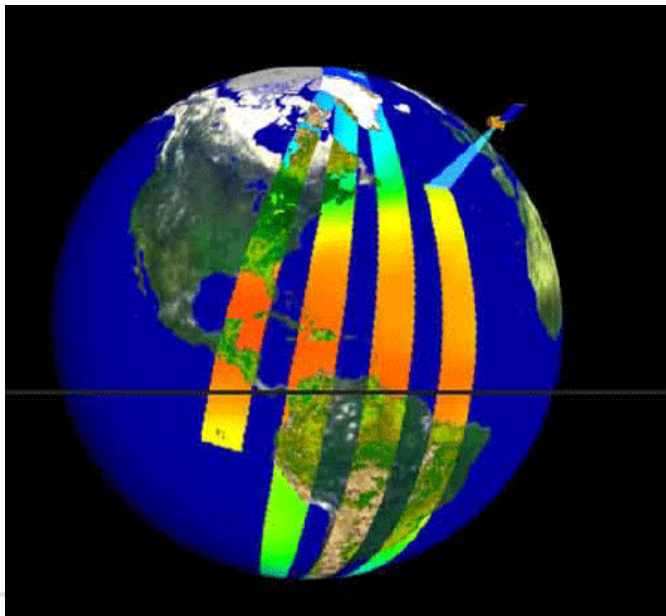
## Orbita polar heliosíncrona

**Cobertura casi global:** más frecuencia en los polos que en el ecuador.

Distancia a la superficie terrestre: 850 km (aprox) → **mejor resolución horizontal** que la órbita geostacionaria.

**Gran variedad de tipos de sensores:** VIS, IR, MW... y posibilidad de sensores activos (perfilador de nubes, escaterómetro...)

**Resolución temporal 12 h** (tarda 100 min en dar una vuelta completa al globo) → **gran constelación de satélites.**



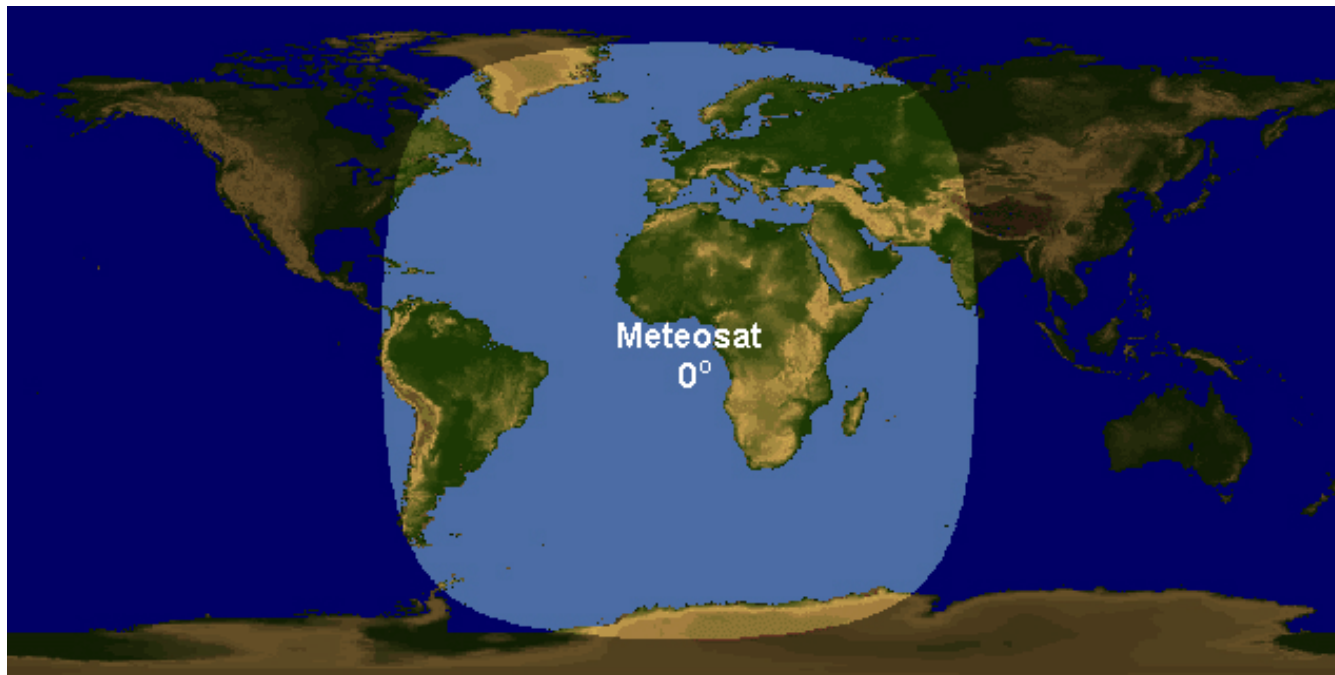
## Orbita geostacionaria

Cobertura: se necesitan 5 satélites para tener una cobertura global.

Distancia a la superficie terrestre: 36000 km (aprox) → MSG: 3 km en el punto subsatélite (1km en HRVIS).

Tipos de sensores: principalmente VIS e IR.

Resolución temporal: actualmente 15 min, MSG en modo normal (5 min Rapid Scan).



# Meteosat Second Generation

## Dos instrumentos a bordo:

**SEVIRI** (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager):

12 canales en VIS e IR:

CANAL	NOMBRE	BANDA RADIOMÉTRICA ( $\mu\text{m}$ )
1	VIS 0,6	0,56-0,71
2	VIS 0,8	0,74-0,88
3	NIR 1,6	1,50-1,78
4	IR 3,9	3,40-4,20
5	WV 6,2	5,35-7,15
6	WV 7,3	6,85-7,85
7	IR 8,7	8,30-9,10
8	IR 9,7	9,38-9,94
9	IR 10,8	9,80-11,80
10	IR 12,0	11,00-13,00
11	IR 13,4	12,40-14,40
12	HRVIS	Banda ancha en el visible (0.4 – 1.1 $\mu\text{m}$ )

Canales VIS: **nubes, albedo y espesores ópticos**

Canales IR cercano: **nubes, fase y radio efectivo y contenido acuoso**

Canales IR en bandas de **absorción** de WV

Canal IR térmico **ventana**: **nubes**

Canal IR térmico con **absorción** de ozono

Canales IR térmico **ventana**: **nubes**

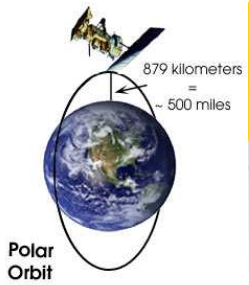
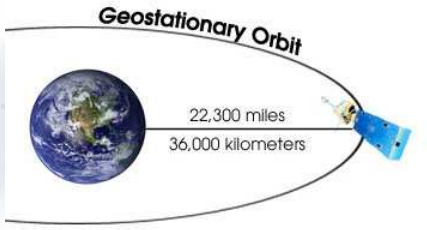
Canal IR térmico con **absorción** de CO<sub>2</sub>

Canal VIS alta resolución: **nubes, albedo, AMVs**

## GERB (Geostationary Earth Radiation Budget)

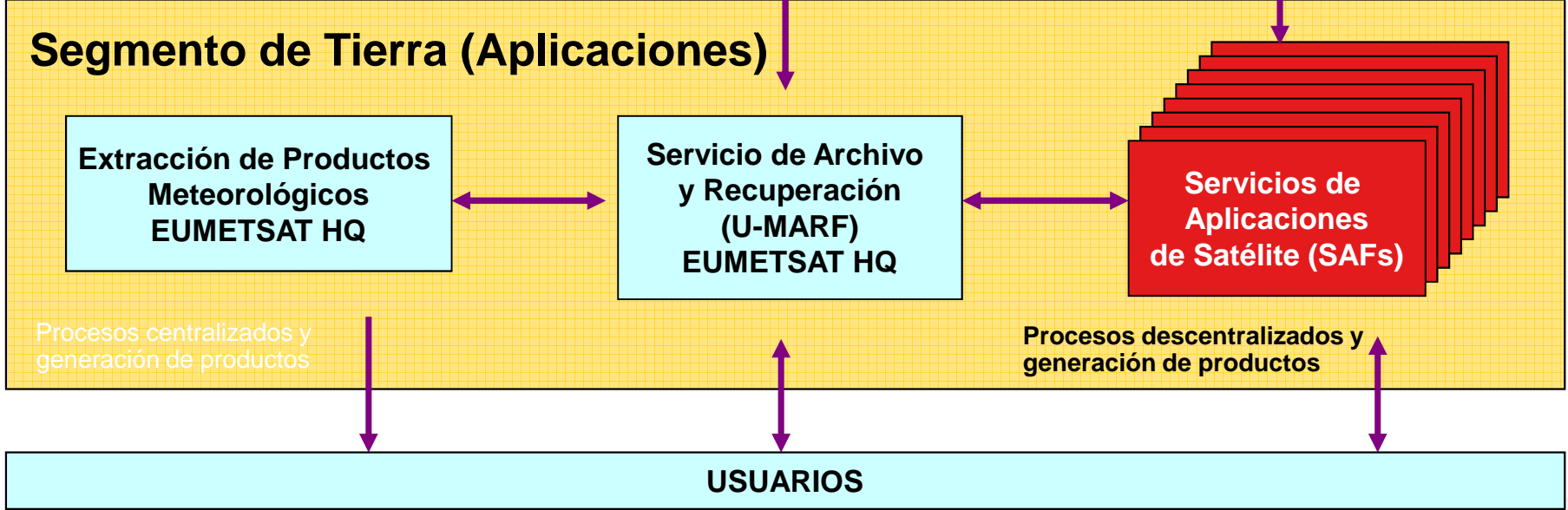
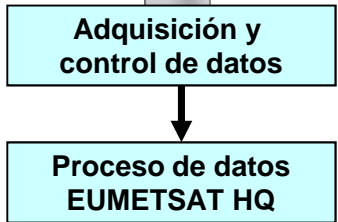
Es un radiómetro visible-infrarrojo a bordo de MSG que toma medidas precisas de las componentes de onda corta y onda larga del balance radiativo → investigación Climatológica

# EUMETSAT

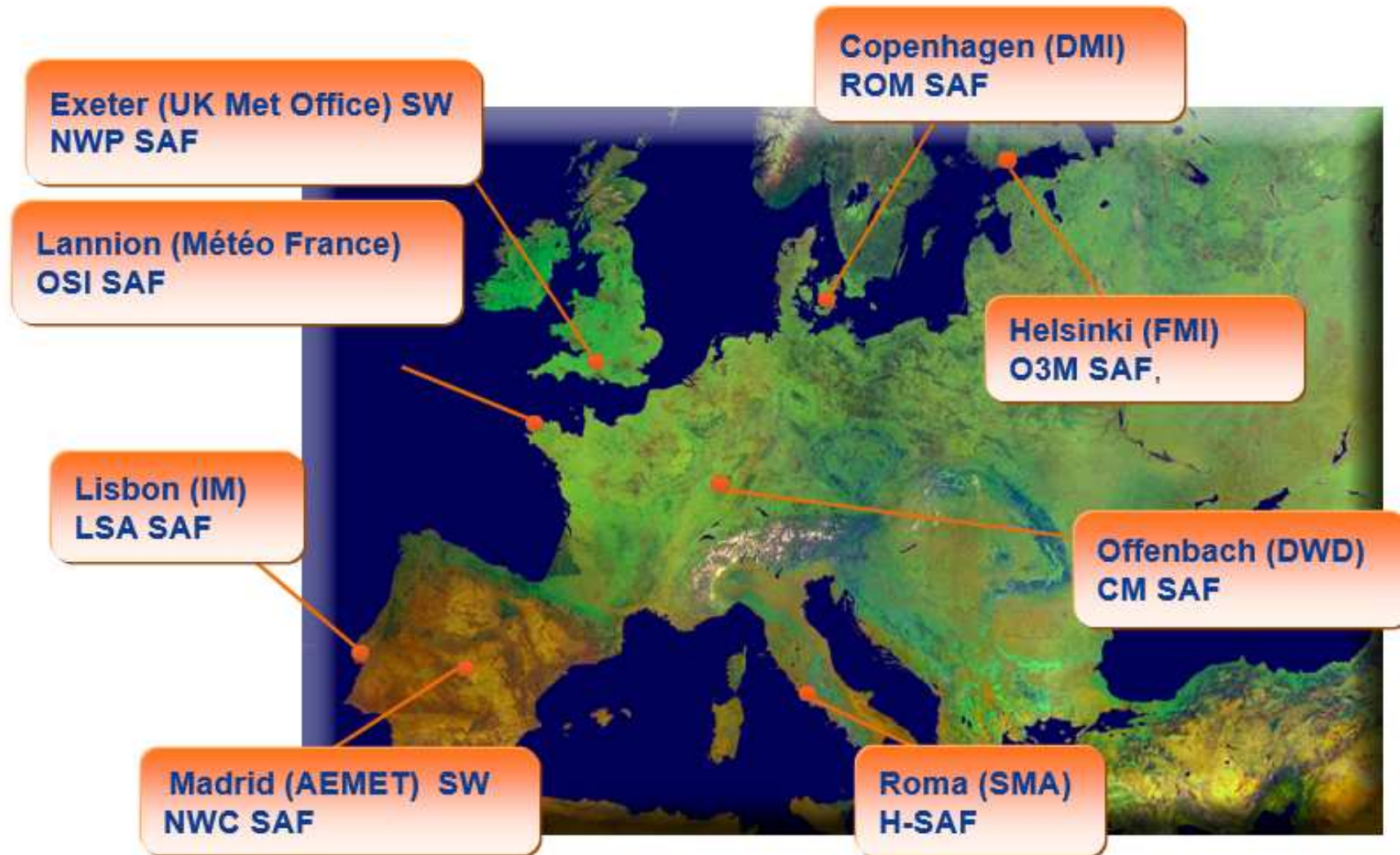


**Sistemas Geoestacionarios EUMETSAT**

**Sistemas Polares EUMETSAT/NOAA**



# Red de SAFs de EUMETSAT





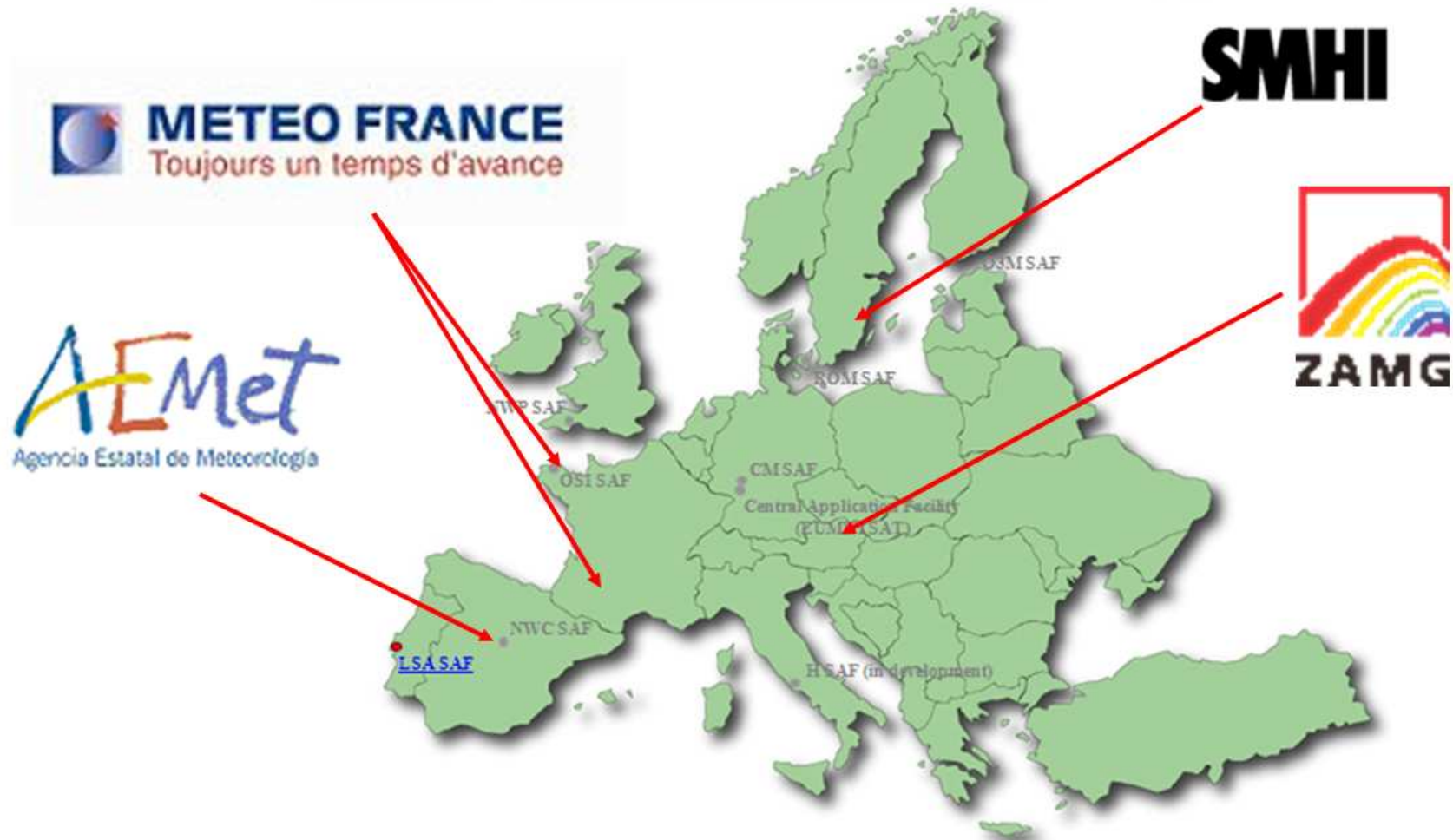
# Consorcio NWC SAF



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología



**NWC SAF: comienza en 1997, se encuentra en la actualidad en la fase CDOP2 (2012-2017)**



# NWC SAF: Objetivos

Proporcionar productos derivados que aseguren el óptimo uso de los datos de los satélites meteorológicos en Predicción Inmediata y a Muy Corto Plazo.

Aplicable a los sistemas Geoestacionario y Polar.

El objetivo final es la distribución de Paquetes de Software a la Comunidad Meteorológica Internacional.

NWC SAF es responsable del desarrollo y mantenimiento de los Productos y Paquetes de Software así como de dar soporte a los usuarios mediante una herramienta Helpdesk y realizar actividades de formación.

# http://www.nwcsaf.org

www.nwcsaf.org/HD/MainNS.jsp

**Help Desk**

**NWC SAF**

Home

Topical Images Gallery



[SAFNWC General Information](#)  
[Scientific Documentation](#)  
[Visiting Scientist Activities](#)  
[VSA Announcements](#)  
[VSA Reports](#)  
[SW Delivery Conditions](#)  
[Workshops, Surveys & Training](#)

**Sign in**

**EUMeTrain**

News

- Visiting Scientist 12/02/2018
- Patch for SAFNWC/PPS v2014 14/12/2015
- New Patch for NWC SAF/MSG available 10/12/2015
- PPS v2014 patch in SW Packages & Databases

The EUMETSAT Network of Satellite Application Facilities

**NWC SAF**  
Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting

**AEMet**  
Agencia Estatal de Meteorología

**MSG**

**MSG Cloud Products**

- Cloud Mask [\(Description\)](#)
- Cloud Type [\(Description\)](#)
- Cloud Top Temperature and Height [\(Description\)](#)

**MSG Precipitation Products**

- Precipitating Clouds [\(Description\)](#)
- Convective Rainfall Rate [\(Description\)](#)
- Prec. Prod. Cloud Physical Properties [\(Description\)](#)

**MSG Clear Air Products Physical Retrieval**

- Total Precipitable Water [\(Description\)](#)
- Layer Precipitable Water [\(Description\)](#)
- Stability Analysis Imagery [\(Description\)](#)

**MSG Winds, Conceptual Model and Convection Products**

- High Resolution Winds [\(Description\)](#)
- Automatic Satellite Image Interpretation [\(Description\)](#)
- Rapid Development Thunderstorms [\(Description\)](#)

**PPS**

- Cloud Mask [\(Description\)](#)
- Cloud Type [\(Description\)](#)
- Cloud Top Temperature and Height [\(Description\)](#)
- Precipitating Clouds [\(Description\)](#)
- Cloud Physical Properties (CPh) [\(Description\)](#)
- Cloud Physical Properties (LWP) [\(Description\)](#)

**PGEs Execution Time**

# Generación de Productos

Los productos se generan bajo las premisas de los usuarios

Características de los productos (SAFNWC/MSG):

- Generación en **casi tiempo real** (NRT)
- Generación a **resolución completa IR SEVIRI**: (3 km x 3 km) en el punto subsatélite
- **Frecuencia seleccionada por el usuario**. Modo normal (15 min) o modo Rapid Scan (5min)
- **Región seleccionada por el usuario**
- Formatos **HDF5 y BUFR** → NetCDF



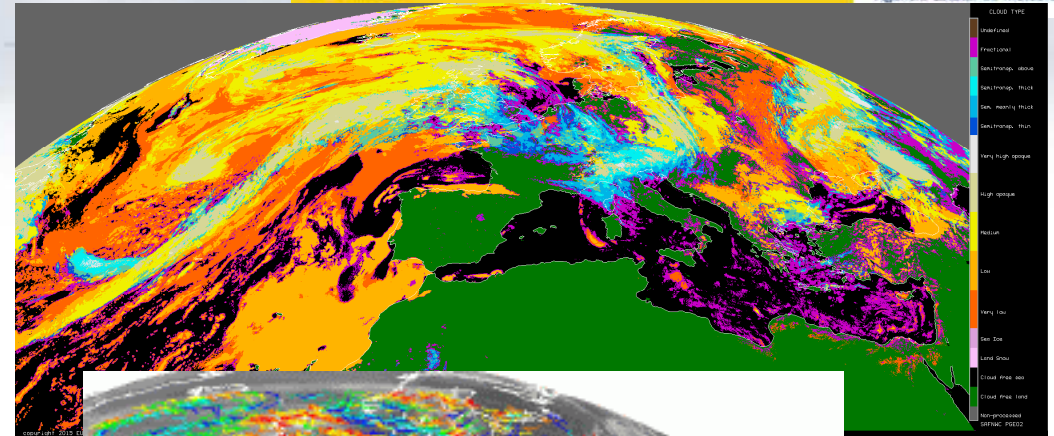
GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

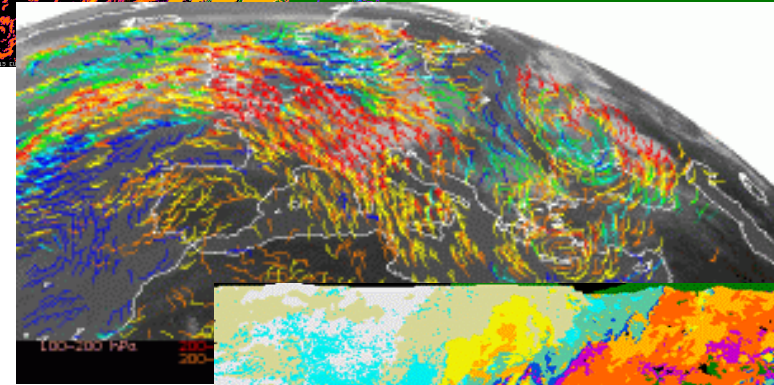
AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

# NWC SAF - productos de nube y vientos

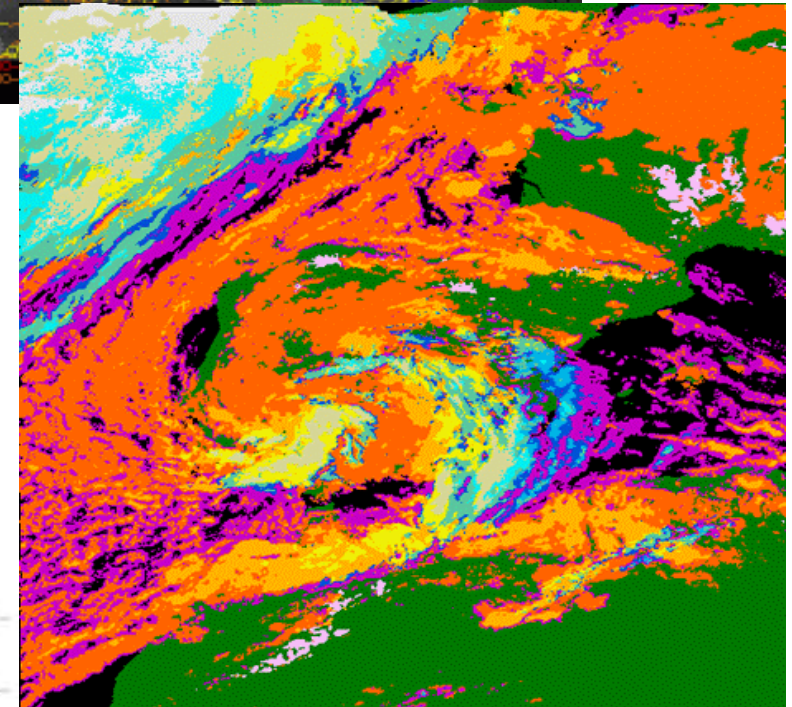
**CT - Tipo de Nube:** información de las categorías nubosas en todos los píxeles identificados como nubosos por la máscara nubosa.



**HRW - Vientos de Alta Resolución:** conjunto de vectores de viento a alta resolución en distintas capas, a partir de trazadores obtenidos de imágenes SEVIRI.

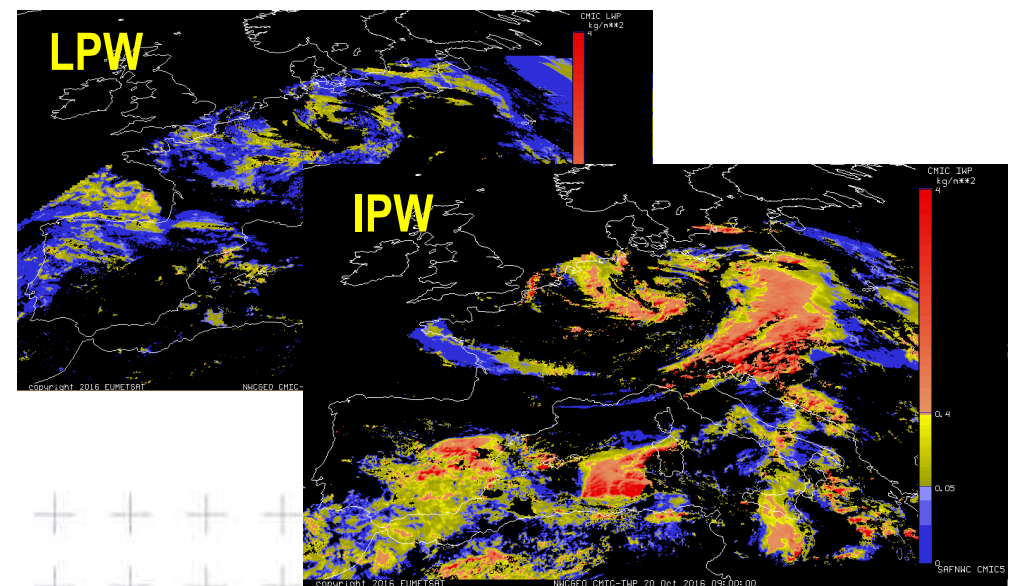
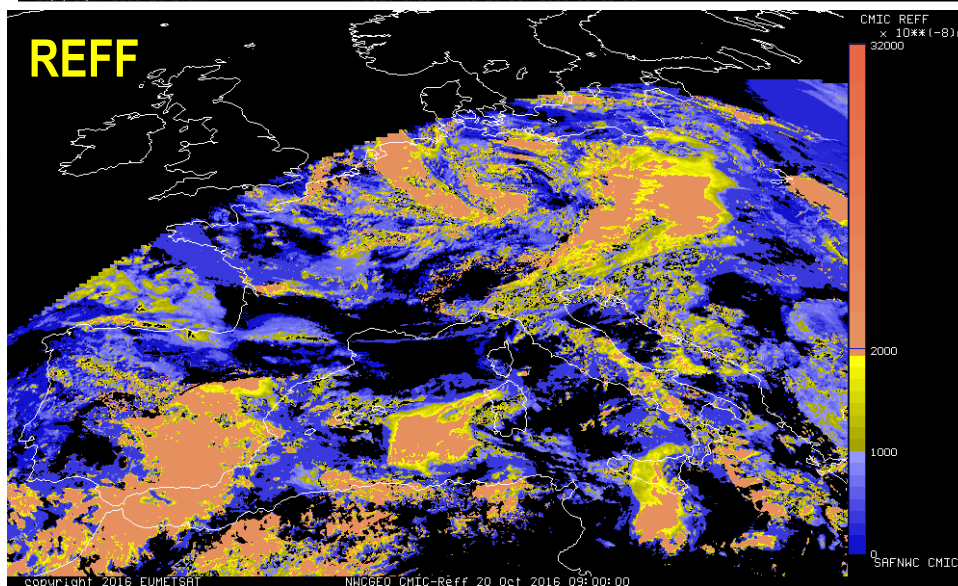
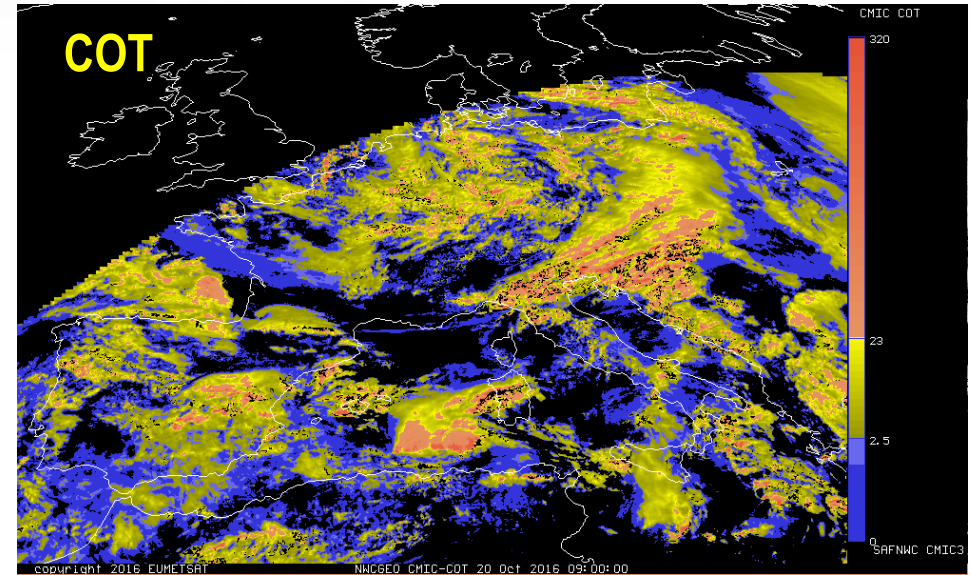
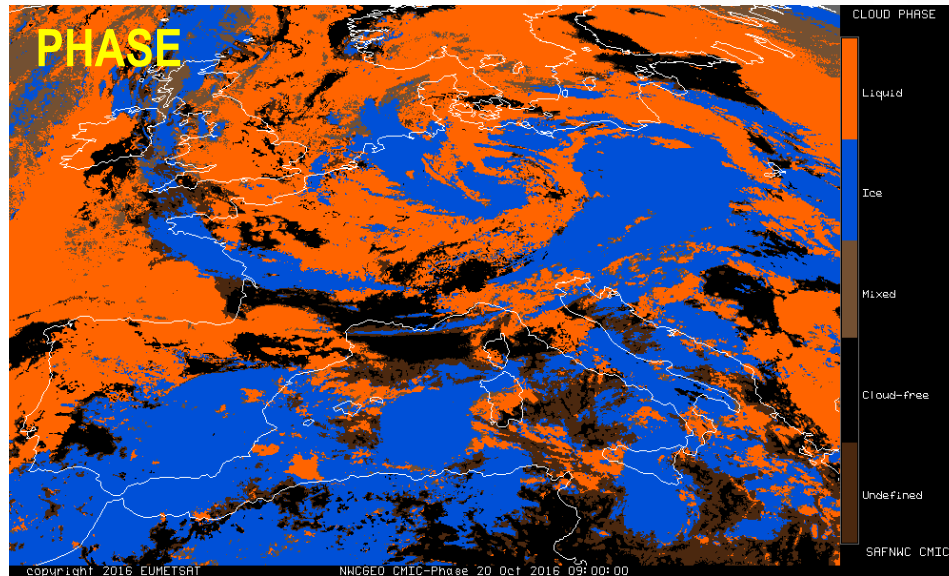


**EXIM - Extrapolación de imágenes:** Extrapolación temporal de imágenes de satélite y productos utilizando los vientos de alta resolución.



# CMIC – Microfísica de la Nube

Producto con 5 bandas: Fase, Espesor Óptico, Radio efectivo, Trayectoria acuosa nubosa





GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

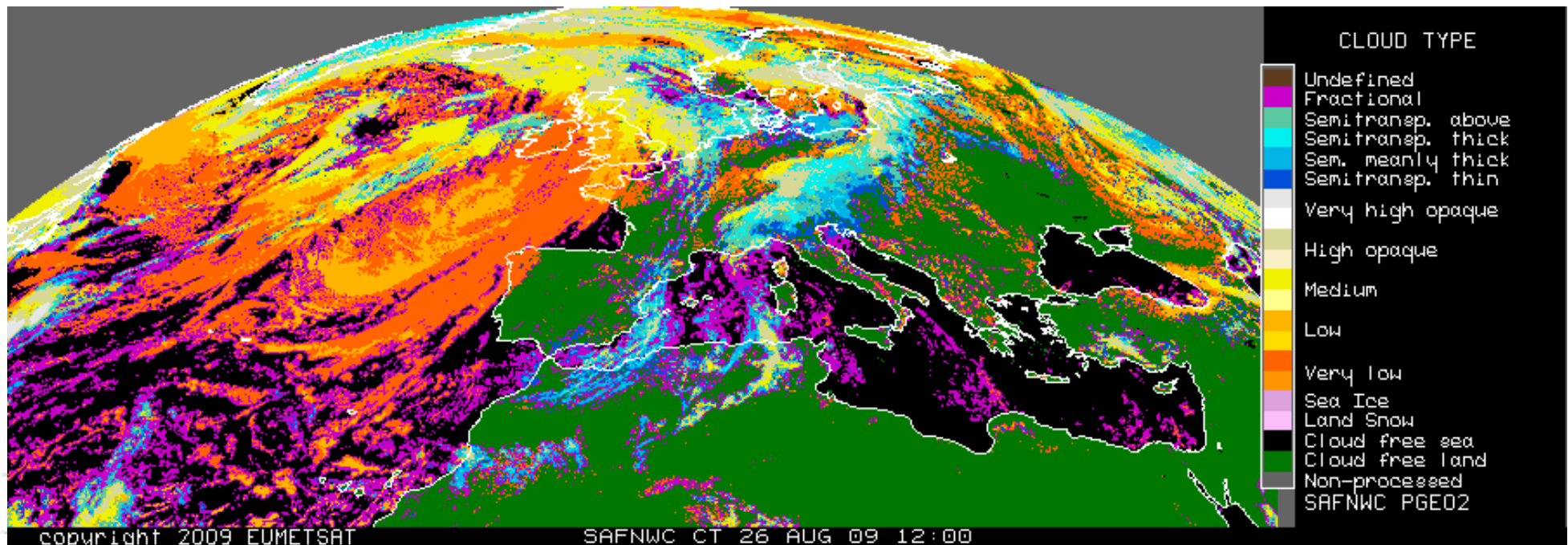
Aemet  
Agencia Estatal de Meteorología

# CT - Tipo de Nube

Información a cerca de la mayor parte de clases de nubes: nubes fraccionales, semitransparentes, altas, medias y bajas (incluyendo niebla) para todos los píxeles con nube según la máscara nubosa.

Método de umbrales multispectrales →

Los umbrales aplicados dependen de las condiciones de iluminación, mientras que los valores de los umbrales en si mismos pueden depender de la iluminación, de la geometría de visión, de la localización geográfica y de los campos del modelo numérico que dan el contenido de vapor de agua en la atmósfera y la estructura vertical de la atmósfera.



# CT - Tipo de Nube: entradas del producto

## 7 Canales SEVIRI:

R0.6 $\mu$ m	R1.6 $\mu$ m	T3.9 $\mu$ m	T7.3 $\mu$ m	T8.7 $\mu$ m	T10.8 $\mu$ m	T12.0 $\mu$ m
Obligatorio		Obligatorio			Obligatorio	Obligatorio

## Producto CMa:

Se hace la clasificación nubosa únicamente para píxeles nubosos.

## Parámetros de modelos numéricos:

- **Temperatura en superficie**
- **Temperatura del aire en 950 hPa** (de manera alternativa se usa en 925 hPa) (para comprobar las inversiones en niveles bajos), 850hPa, 700hPa, 500hPa y al nivel de la tropopausa.
- **Contenido total de vapor de agua** en la atmósfera
- **Altitud de la rejilla** del modelo (de manera alternativa se usa el geopotencial en la rejilla del modelo).

## Datos auxiliares:

- Atlas mar/tierra
- Atlas de elevaciones
- Datos climatológicos



**AEMET** está participando en la actualidad en un proyecto con **REE** con el objetivo de mejorar la predicción de la radiación solar en los emplazamientos de las plantas solares españolas.

## AEMET → REE

Diseñar, validar y poner operativa una herramienta que en intervalos de 15/30 minutos facilite predicción de radiación solar directa y global para las siguientes 4 horas, con una resolución temporal de 15 minutos.

SAF	Distribución SAF+ Harmonie		Harmonie
1 <sup>a</sup> hora	2 <sup>a</sup> hora	3 <sup>a</sup> hora	4 <sup>a</sup> hora

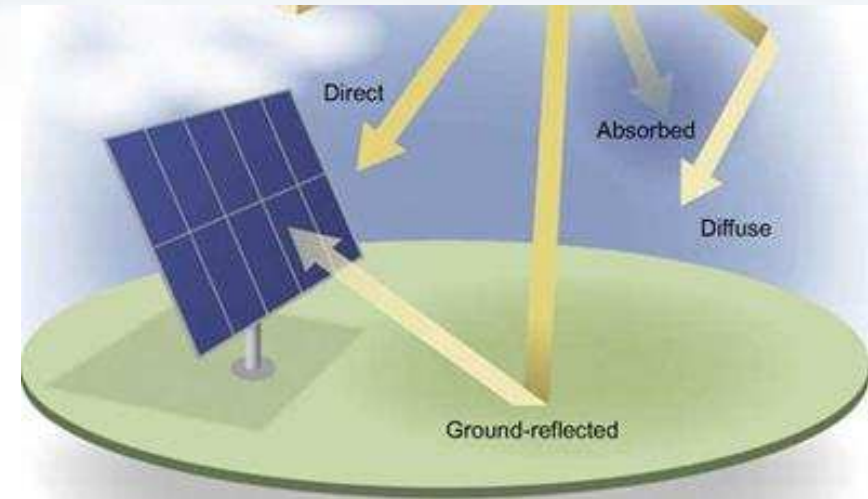
# Radiación Solar: componentes a predecir

Las tres componentes principales de la radiación solar que se reciben en la superficie terrestre son :

**Radiación Solar Directa:** incide directamente del sol

**Radiación Solar Difusa:** dispersada principalmente por nubes y aerosoles y otros componentes atmosféricos.

**Radiación Solar Reflejada** por el suelo y objetos cercanos.



NREL

Difusa horizontal

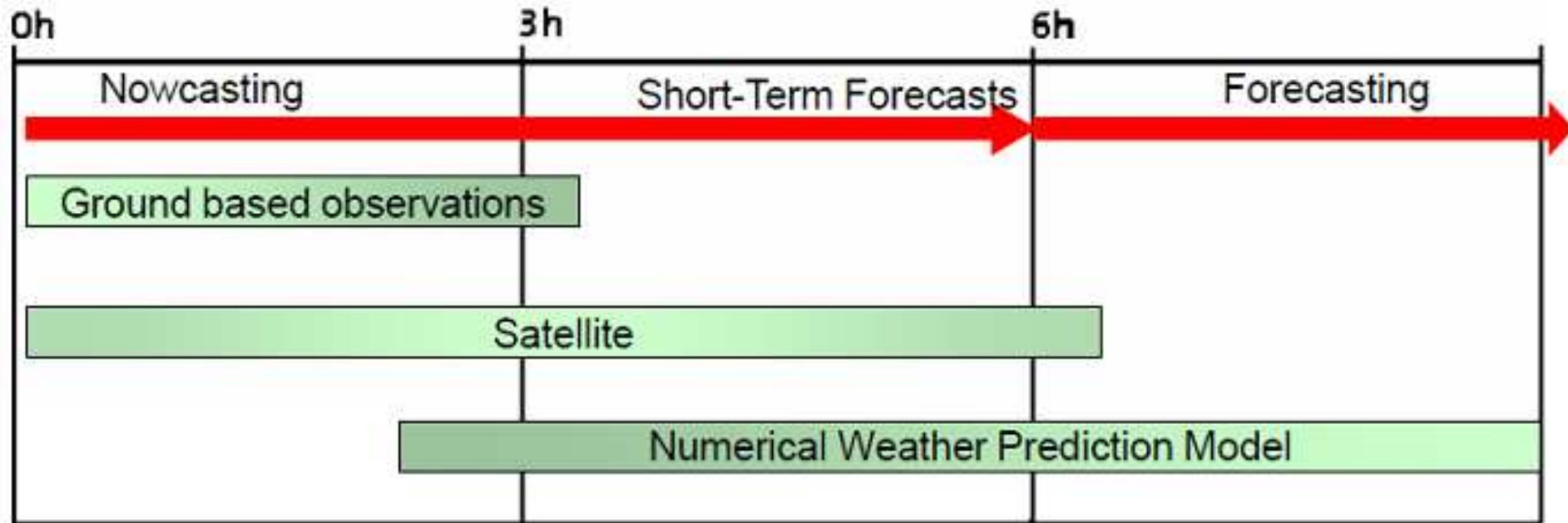
$$\text{GHI} = \text{DHI} + \text{DNI} * \cos (Z)$$

Global Horizontal Irradiance  
Fotovoltaicas convencionales

Direct Normal Irradiance  
Termosolares y fotovoltaicas de concentración

# Rangos de Predicción

Límites no bien definidos:



- **Cámaras de cielo** (TSI-Total Sky Imagery) combinadas con técnicas de seguimiento de nubes proporcionan predicciones a muy altas resoluciones temporales y espaciales (**min, 100m, aunque cobertura limitada: pocos Km**).
- La aplicación de AMV's sobre un Índice nuboso permite obtener predicciones de la radiación solar a partir de **datos de satélite** para un horizonte temporal que incluye el nowcasting y el corto plazo. (**MSG, 15 min, 3km**).
- El campo de aplicación de los **NWP** sería el corto plazo y el forecasting. (**HARMONIE, 1h, 2.5 Km**).

# Esquema clásico con datos de satélite



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

Método Heliosat (diferentes desarrollos y mejoras desde 1986):

- **Cloud index**,  $n$ , Información del **albedo efectivo** de la nube para cada píxel a partir de las reflectancias en el canal visible:

$$n = (R - R_{sfc}) / (R_{max} - R_{sfc})$$

$R$ , reflectancia observada,  $R_{max}$ , reflectancia máxima y  $R_{sfc}$ , reflectancia en aire claro (las dos últimas se determinan estadísticamente en base 30 días).

- **Clear sky index**,  $K^*$ , **medida de la transmisividad de las nubes**, se define como la relación entre la radiación global en superficie y la radiación global en aire claro, teniéndose:

$$K^* = GHI / GHI_{clear} \sim 1 - n$$

- $GHI \approx (1 - n) * GHI_{clear}$

- $GHI_{clear}$  se obtendría a partir de un modelo de transferencia radiativa.

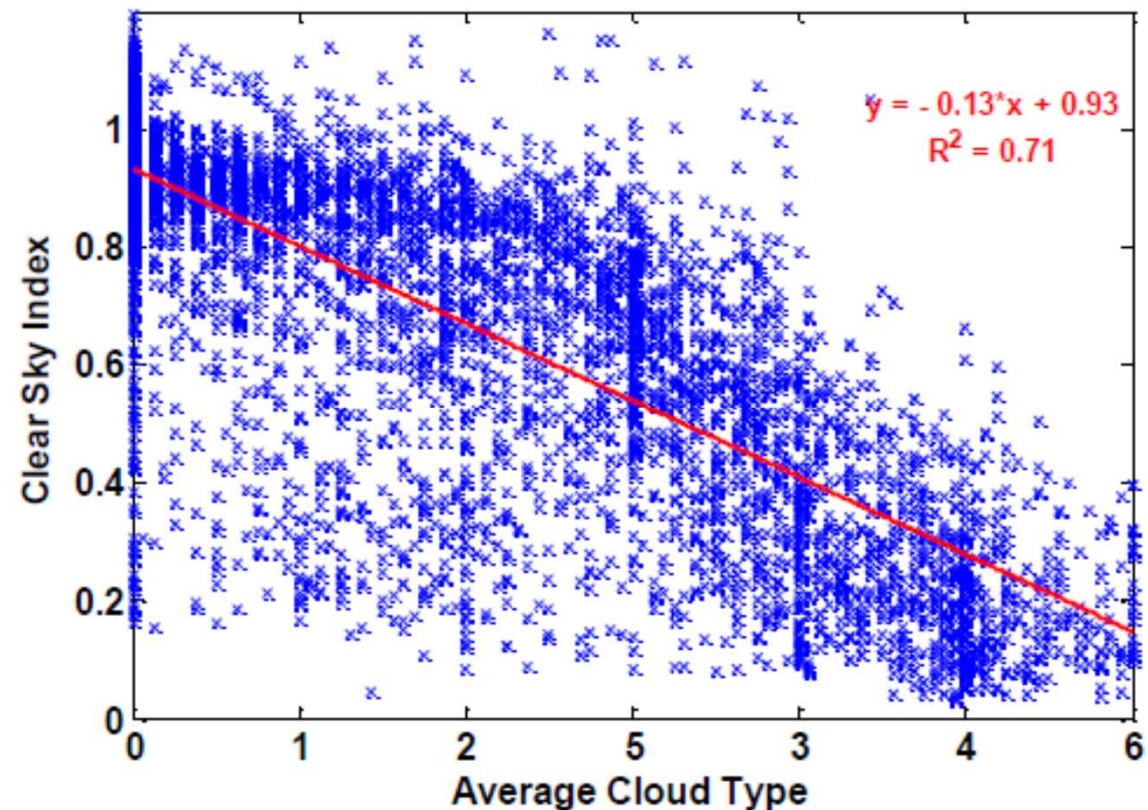
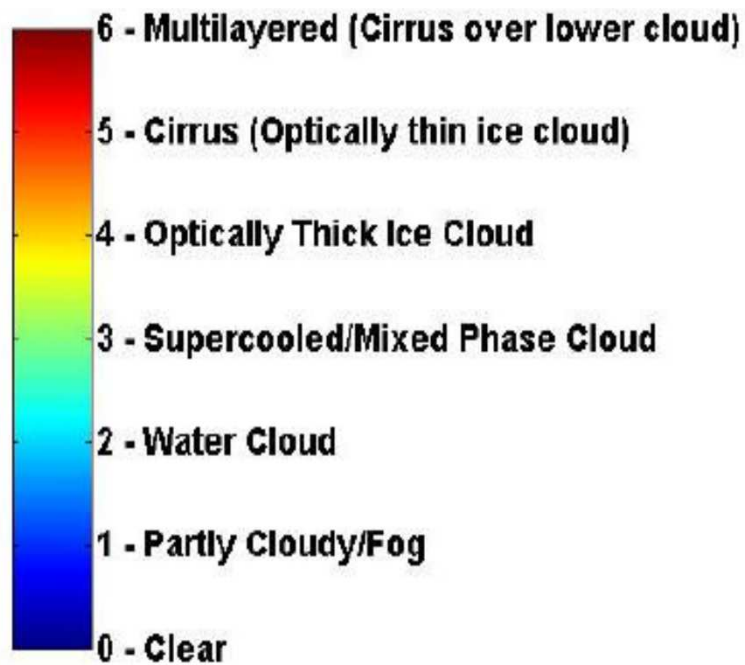
$GHI \rightarrow DNI$ : funciones empíricas.

A Partir de los **AMVs** se extrapolarían las imágenes del Cloud Index y así se obtendrían los **valores previstos de la radicación solar en superficie**.

# GOES data: CloudType vs Clear Sky Index

Bajo la hipótesis de que el tipo de nube afecta al tamaño de la nube y a la cantidad de radiación bloqueada por la misma, se ha analizado la información de los satélites GOES encontrándose relación entre la clasificación nubosa de la NOAA y los valores medios de la irradiancia en superficie y su variabilidad (\*).

El tipo de nube está relacionado con la tendencia y valor medio del índice de aire claro, aunque se evidencia una cierta dispersión.



\*Reno, M. J., and Stein, J. S., "Using Cloud Classification to Model Solar Variability". ASES National Solar Conference, Baltimore, MD, 2103

Trabajo de calibración:  
CT vs GHI-DNI. Entre las 11 y las 13 U.T.C para el año 2013



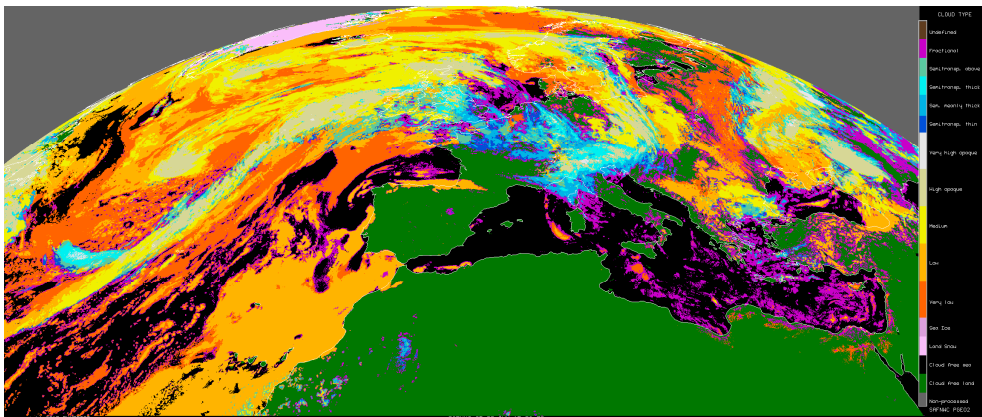
GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

## Productos SAF:

Toma imágenes cada 15 minutos, recoge información sobre la Península aproximadamente a los 10 minutos de empezar.



## Medidas de observación

- Las medidas de observación, GHI y DNI, cada minuto, provienen de la Red Radiométrica Nacional (AEMet). Calculamos el **valor medio de medidas en intervalos de 15 minutos centrados en el minuto en el cual el satélite toma las imágenes sobre la Península Ibérica.**

- Archivo de AEMet.

**Intervalos 15 minutos centrados en los minutos:**

HH:10

HH:25

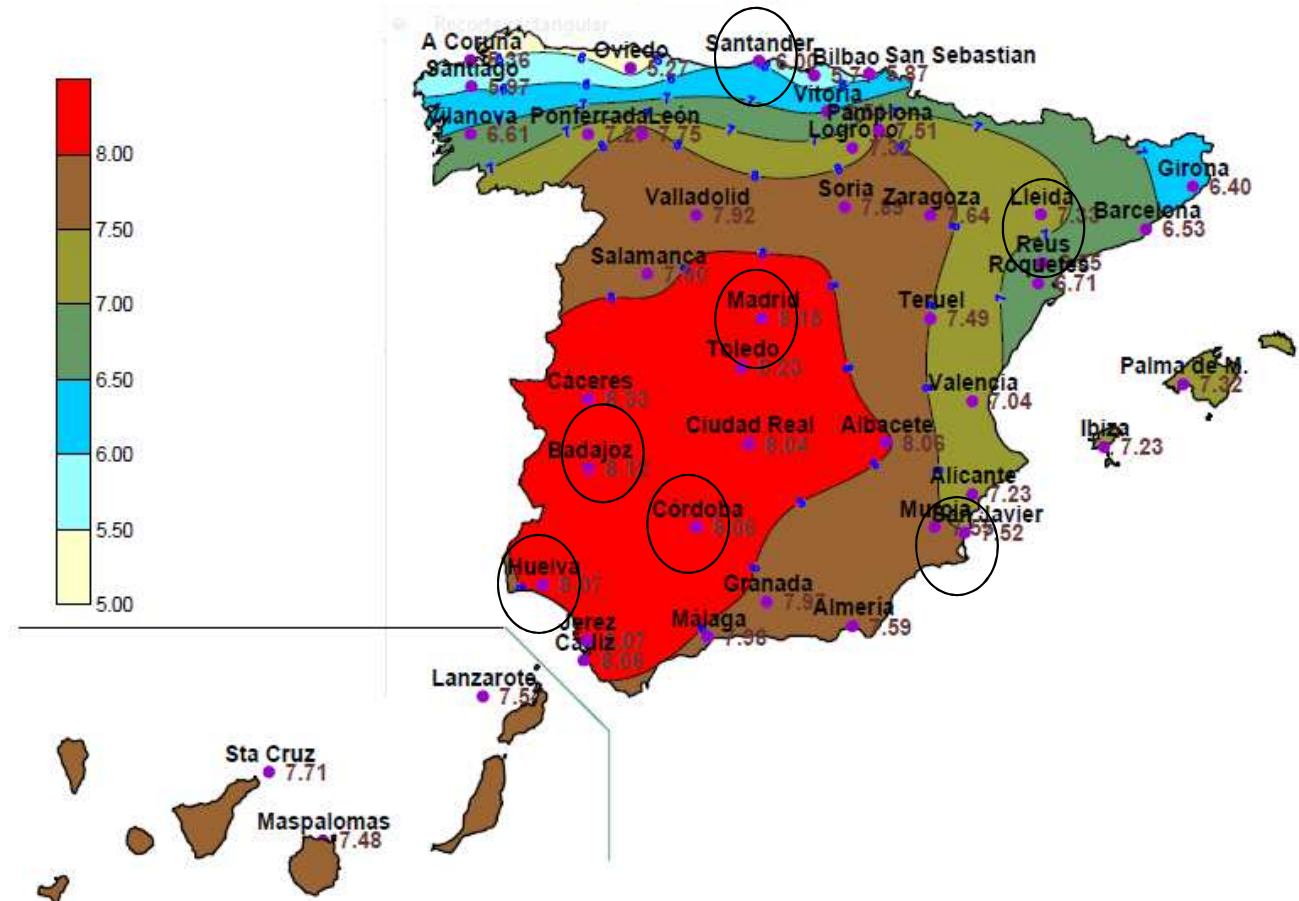
HH:40

HH:55

## Estaciones:

- Arenosillo
- Badajoz
- Córdoba
- Lleida
- Madrid
- Murcia
- Santander

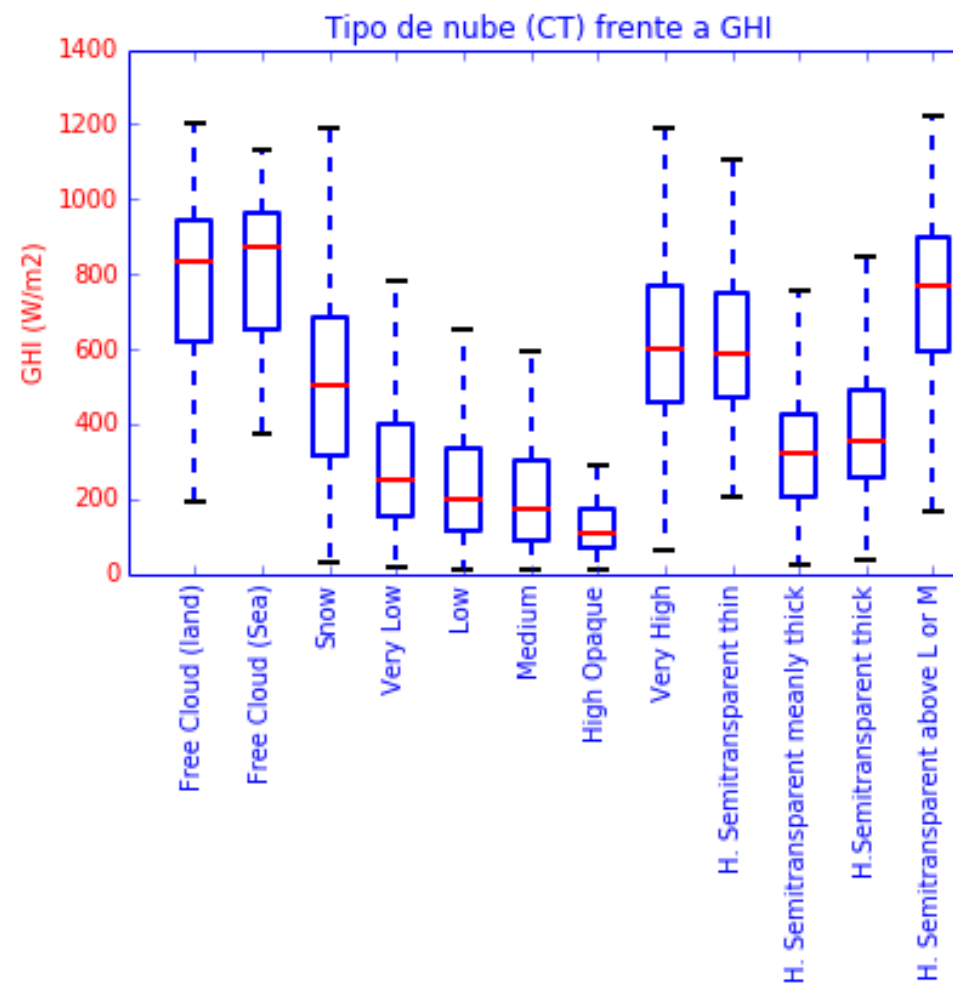
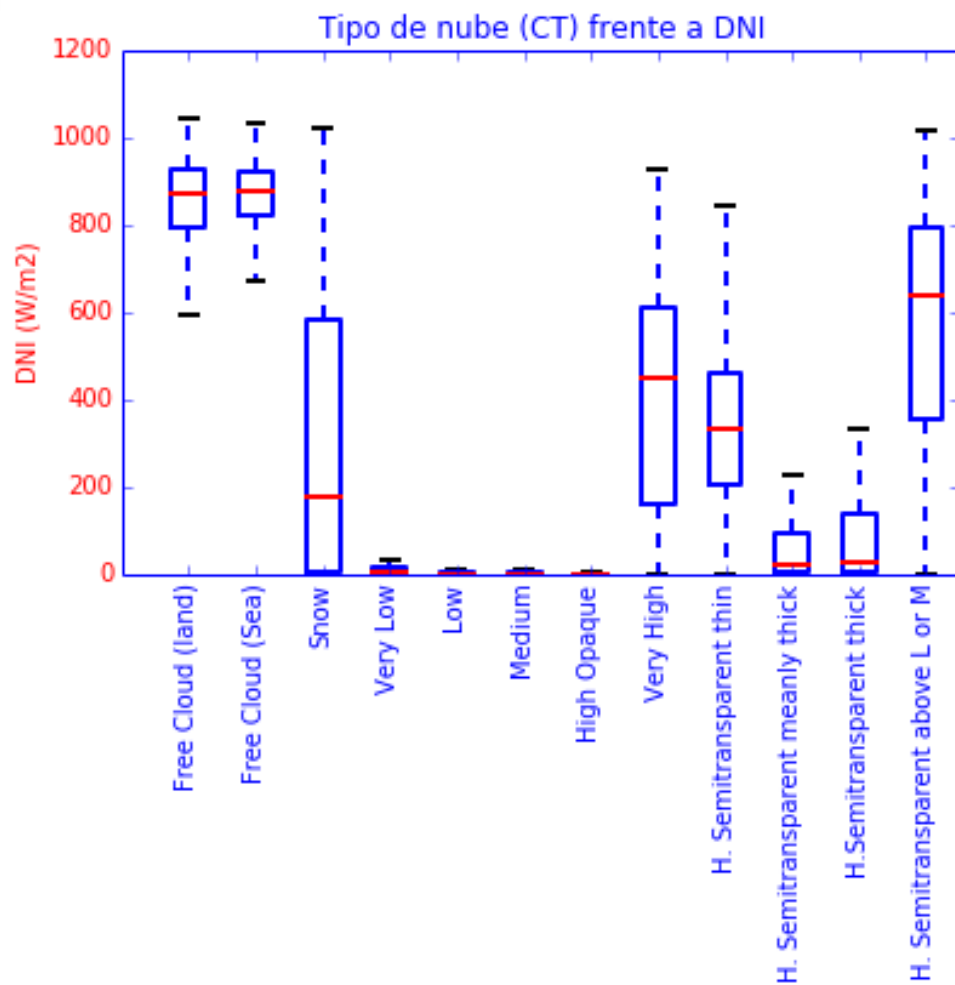
*DISTRIBUCIÓN DE LA IRRADIACIÓN GLOBAL MEDIA DIARIA EN ESPAÑA  
JULIO – 2009 (Kwh/m<sup>2</sup>)*



# Clasificación nubosa del SAF

		CT Clasification	
0	Non-processed containing no data or corrupted data		
1	Cloud free land	2	Cloud free sea
3	Land contaminated by snow	4	Sea contaminated by snow/ice
5	Very low and cumuliform clouds	6	Very low and stratiform clouds
7	Low and cumuliform clouds	8	Low and stratiform clouds
9	Medium and cumuliform clouds	10	Medium and stratiform clouds
11	High opaque and cumuliform clouds	12	High opaque and stratiform clouds
13	Very high opaque and cumuliform clouds	14	Very high opaque and stratiform clouds
15	High semitransparent thin clouds	16	High semitransparent meanly thick clouds
17	High semitransparent thick clouds	18	High semitransparent above low or médium clouds
19	Fractional clouds (sub-pixel wáter clouds)	20	Undefine (Undefine by Cma)







# SAF

→ Nueva clasificación nubosa con sentido físico.

## CT Clasification

- |    |   |
|----|---|
| 1  | Cloud free                                      |
| 2  | Fractional clouds (sub-pixel water clouds)      |
| 3  | High semitransparent thin clouds                |
| 4  | High semitransparent meanly thick clouds        |
| 5  | Very low clouds                                 |
| 6  | High semitransparent above low or medium clouds |
| 7  | High semitransparent thick clouds               |
| 8  | Low clouds                                      |
| 9  | Medium clouds                                   |
| 10 | High opaque clouds                              |
| 11 | Very high opaque clouds                         |

- Número de Pixeles:

1 (3)

Moda de 9 (1)

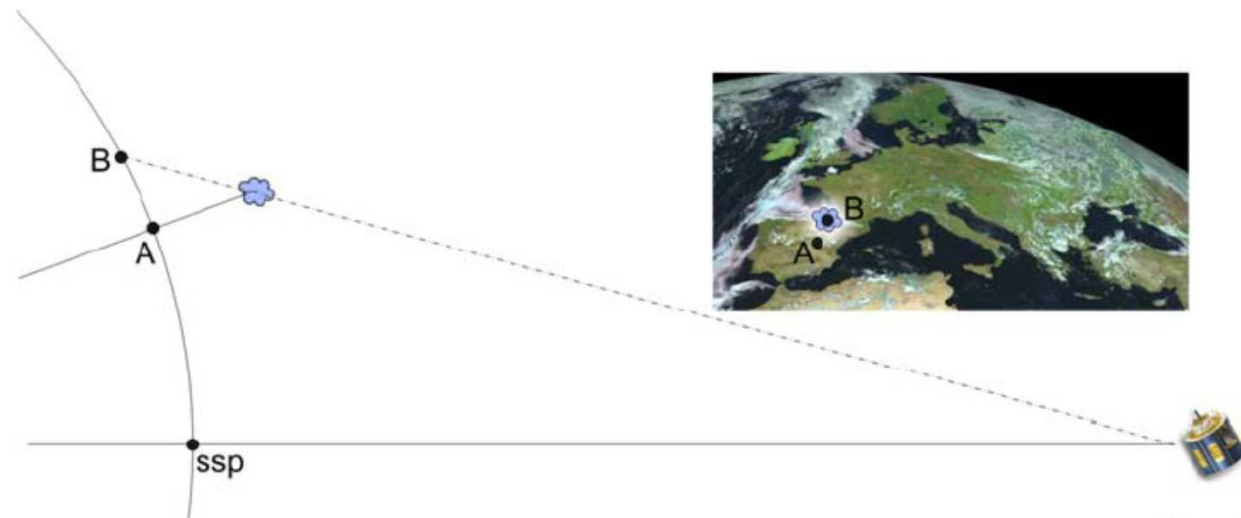
Media de 9 (1,8)

- Paralaje:

- Sin paralaje (CT, EXIM)

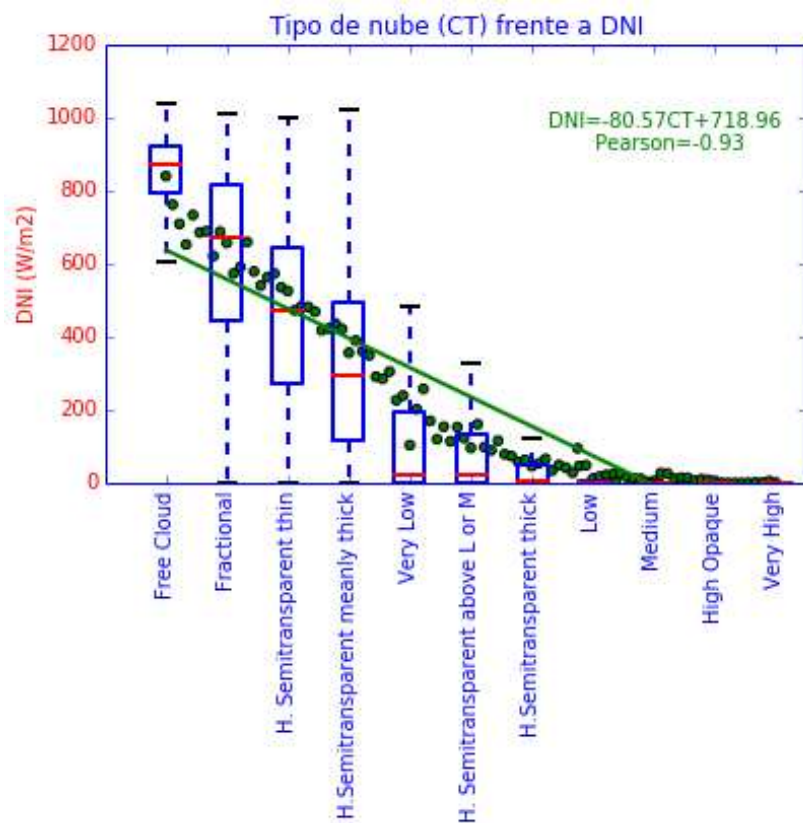
- Con paralaje (CT)

1	1	1
1	3	3
1	3	2

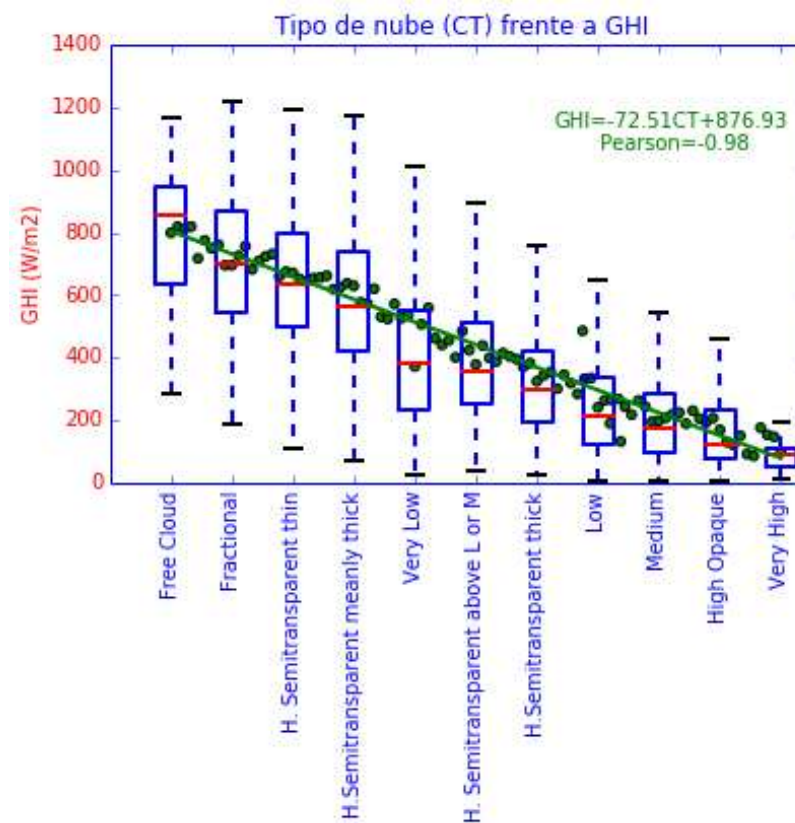


9 Píxeles año 2013

## Media DNI

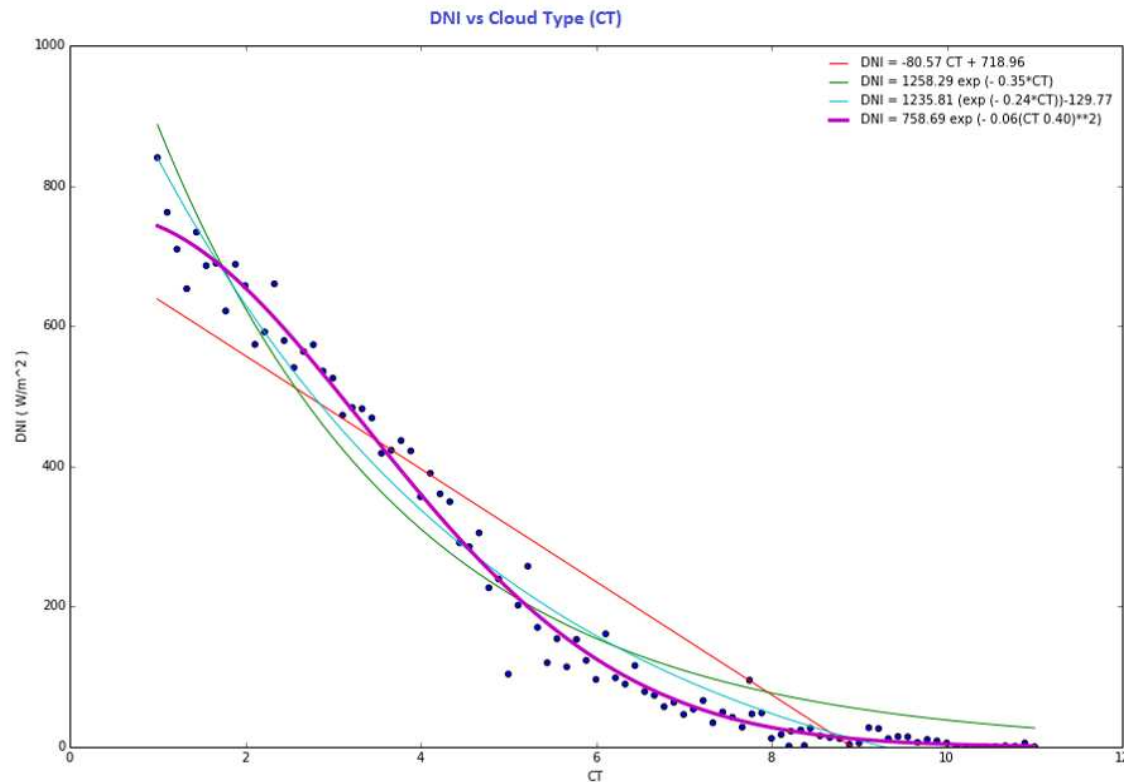


## Media GHI



# Funciones de ajuste estudiadas. 9 Pix

Buscamos una función que reproduzca el comportamiento de los valores de Radiación frente a los del CT - Datos medios



# GHI y DNI Instantáneas: resultados previos



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

- Se ha calculado la **GHI y DNI a partir del CT** utilizando las cuatro funciones de ajuste representadas (entrenamiento con datos del 2013). Se calcularon los estadísticos, **RMSE y BIAS**, comparando la radiación obtenida utilizando tanto para la GHI como para la DNI las cuatro funciones de ajuste citadas en el apartado anterior, con las observaciones del CNR del año **2013**.
- **Resultados poco determinantes en cuanto a la elección de los ajustes** en este momento se decidió **continuar con todas las funciones** tanto para la DNI como para la GHI hasta ver como validaba el prototipo y siempre utilizando la media de los pixeles frente a trabajar con un solo píxel debido a una mejora en los resultados.
- **2013 y 2014**: Se ha realizado el mismo estudio con datos del año 2014 (dataset de entrenamiento 2013) obteniéndose que el RMSE disminuye del orden de 10 (180 -> 170 para la GHI) y el BIAS pasa a ser negativo del orden de -30. Esto nos lleva a pensar en **la utilización de más años** en el entrenamiento para incluir más variabilidad.

\*Sólo datos entre las 11 y las 13 U.T.Z.

# Acumulaciones horarias previstas: resultados previos

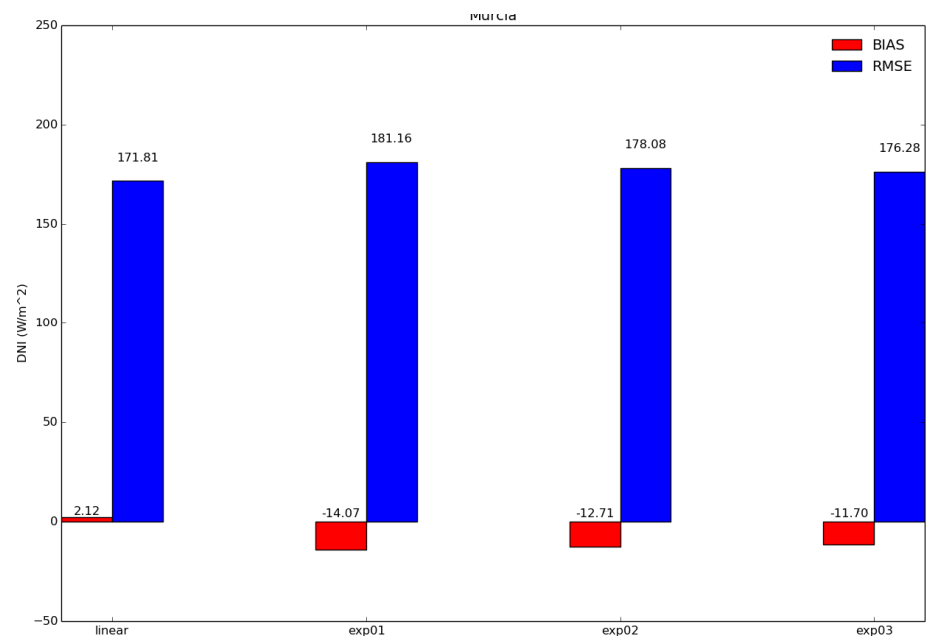
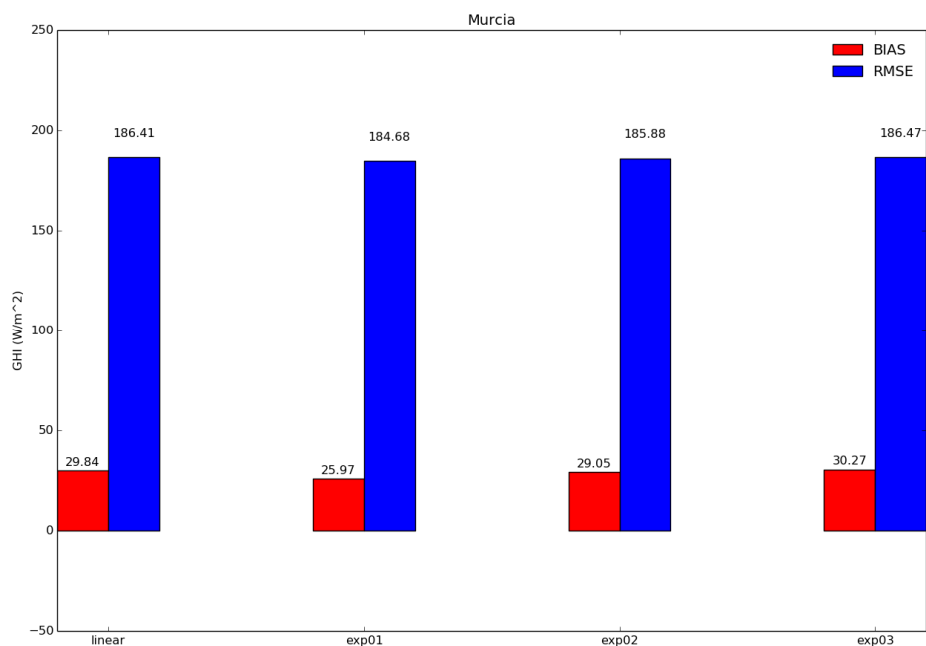
Cálculo de la **predicción de la GHI y DNI acumulada** horaria a partir de los valores cada quince minutos previstos por el **EXIM**.

- \* **Radiación instantánea** para cada categoría nubosa según funciones de ajuste.
- \* **Acumulaciones** → promediando las instantáneas de la hora anterior
- \* **Predicciones desde 15 hasta 240 min cada 15 min.**

**Comparación de acumulaciones horarias DNI y GHI previstas por el EXIM con las acumulaciones observadas en las 7 estaciones del CNR** (Arenosillo, Badajoz, Córdoba, Lleida, Madrid, Murcia y Santander).

\*Para ello hemos utilizado las **funciones ajustadas con datos del 2013** y comparado las **predicciones y observaciones del 2015** (desde el 26 de junio del 2015).

# Acumulaciones previstas a 15 min: resultados previos, Murcia



**RMSE: no grandes diferencias** para la GHI, más para la DNI, según los diferentes ajustes utilizados, siendo más estable para la GHI para los diferentes alcances.

**BIAS de diferente signo:** positivo para la GHI y negativo de mayor magnitud para la DNI



## Acumulaciones horarias: resultados previos

Literatura científica\*: **RMSE** representa bien la dispersión de los valores horarios. Sus valores normalizados por la media de la observación (**nRMSE**) de la GHI y DNI horaria observada oscilan entre:

GHI → **15%-30%** regiones nubosas y latitudes medias

Murcia: (15-60-120-180-240 min) -> (**29%-29%-30%-31%-32%**)

Global: -> (**35%-37%-38%-40%-42%**)

DNI → **25%-45%** regiones nubosas y latitudes medias

Murcia: (15-60-120-180-240 min) -> (**28%-32%-39%-40%-41%**)

Global: -> (**33%-40%-45%-52%-56%**)

→ Calibrar por estación ?

\*Perez, R., T. Cebeauer, M. Suri, (2013): Semi-Empirical Satellite Models, in: Solar Resource Assessment and Forecasting (Editor Jan Kleissl), Elsevier, 2013.

## Acumulaciones horarias previstas: evolución anual, Murcia

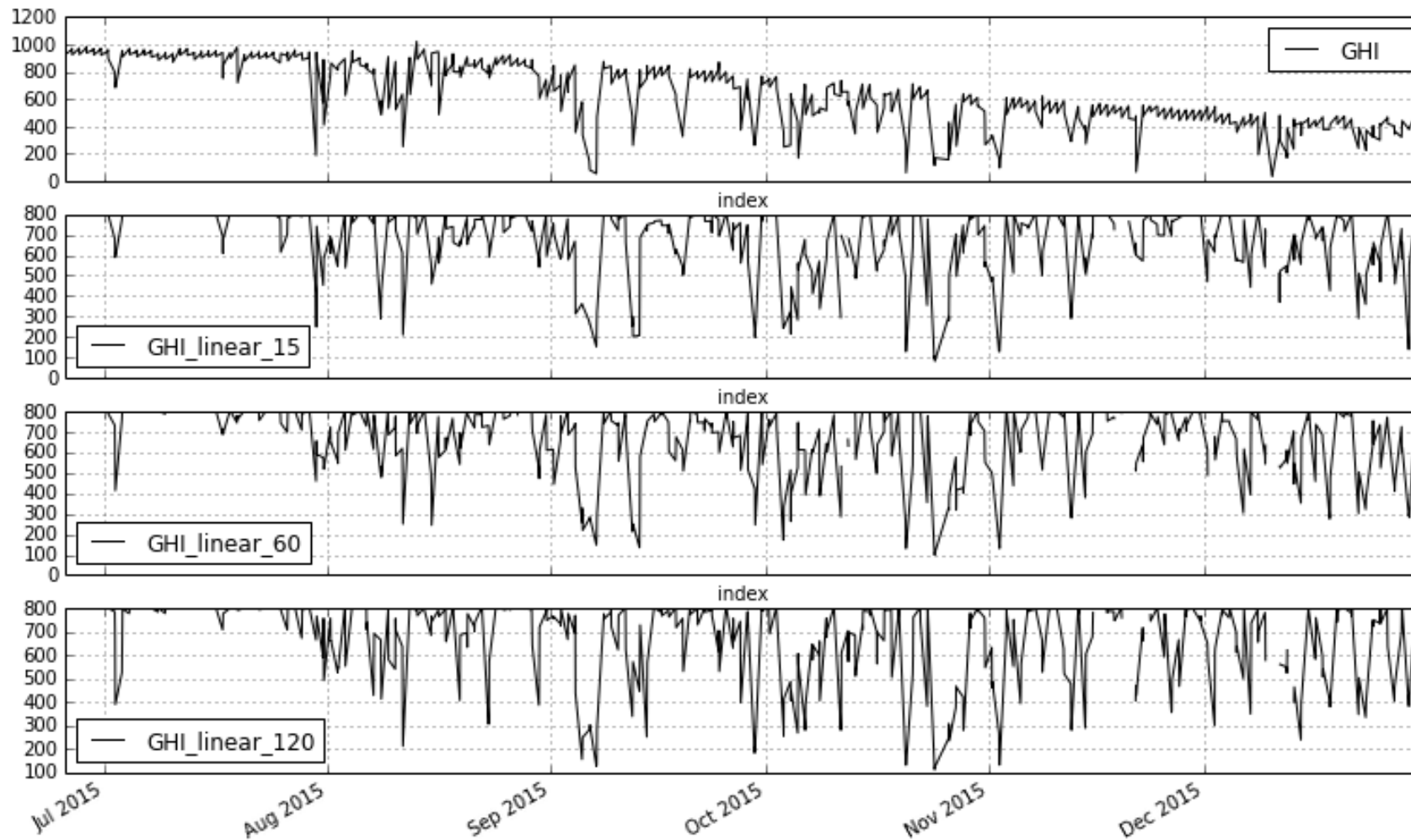


GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

Murcia, **GHI observada y prevista** según la **función lineal a 15, 60 y 120 minutos** a lo largo del periodo de validación.



→ Calibrar por meses

## Acumulaciones horarias previstas: evolución anual, Murcia

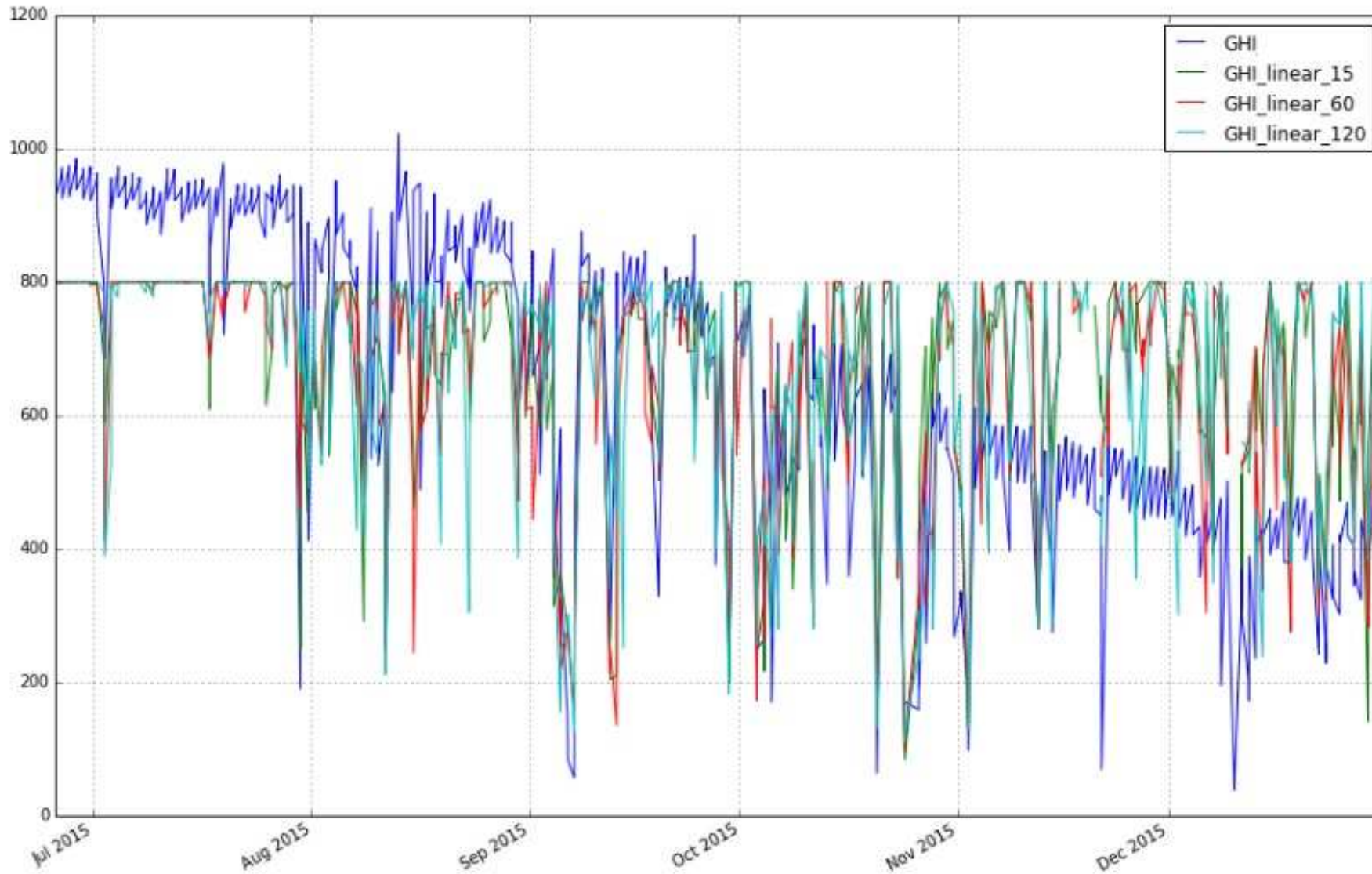


GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

Murcia, GHI observada y prevista según la función lineal a 15, 60 y 120 minutos.  
No se representa la estacionalidad. Bias positivo.



# Acumulaciones horarias previstas: evolución anual, Murcia

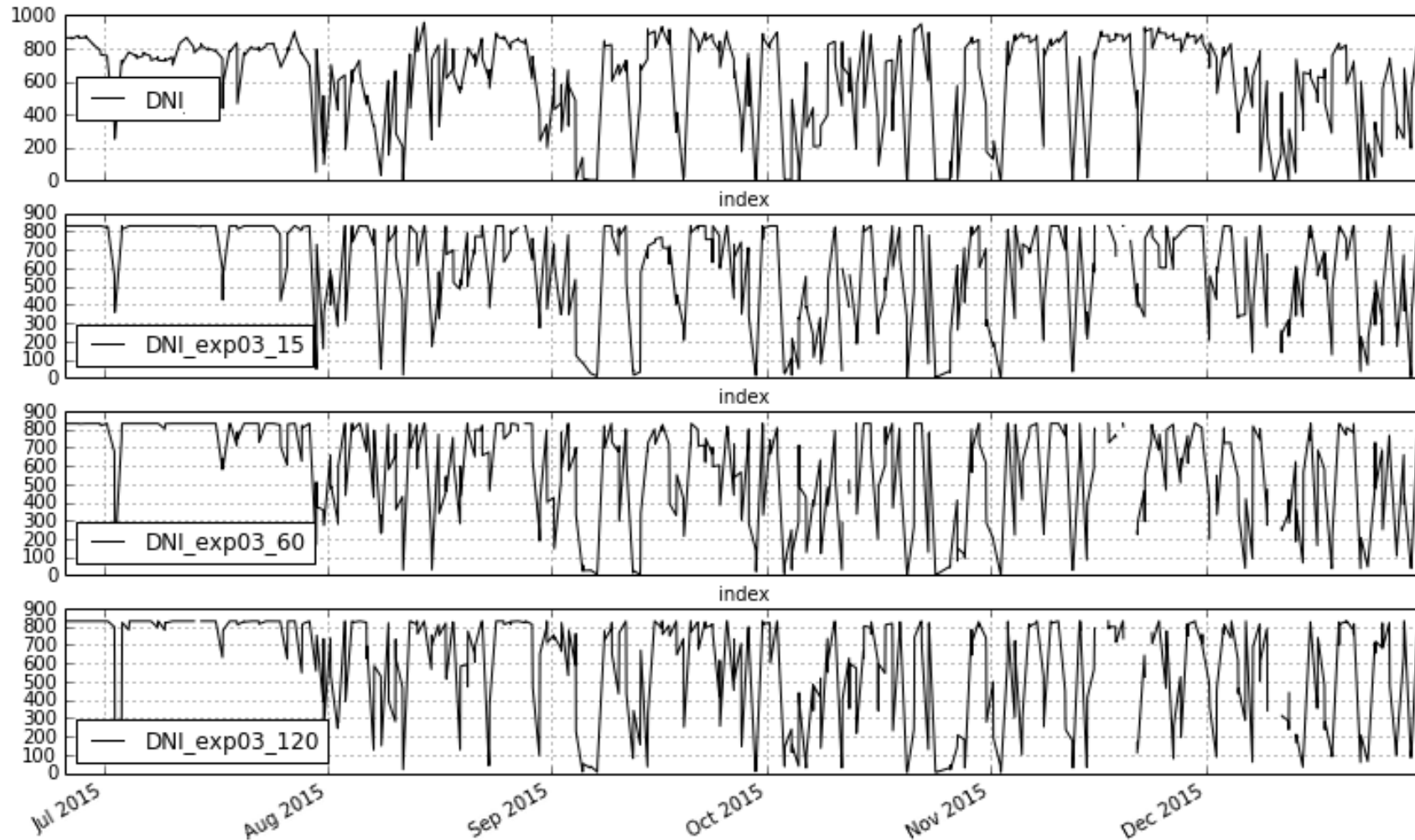


GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



Murcia, DNI observada y prevista según la función gaussiana a 15, 60 y 120 minutos a lo largo del periodo de validación.



## Acumulaciones horarias previstas: evolución anual, Murcia

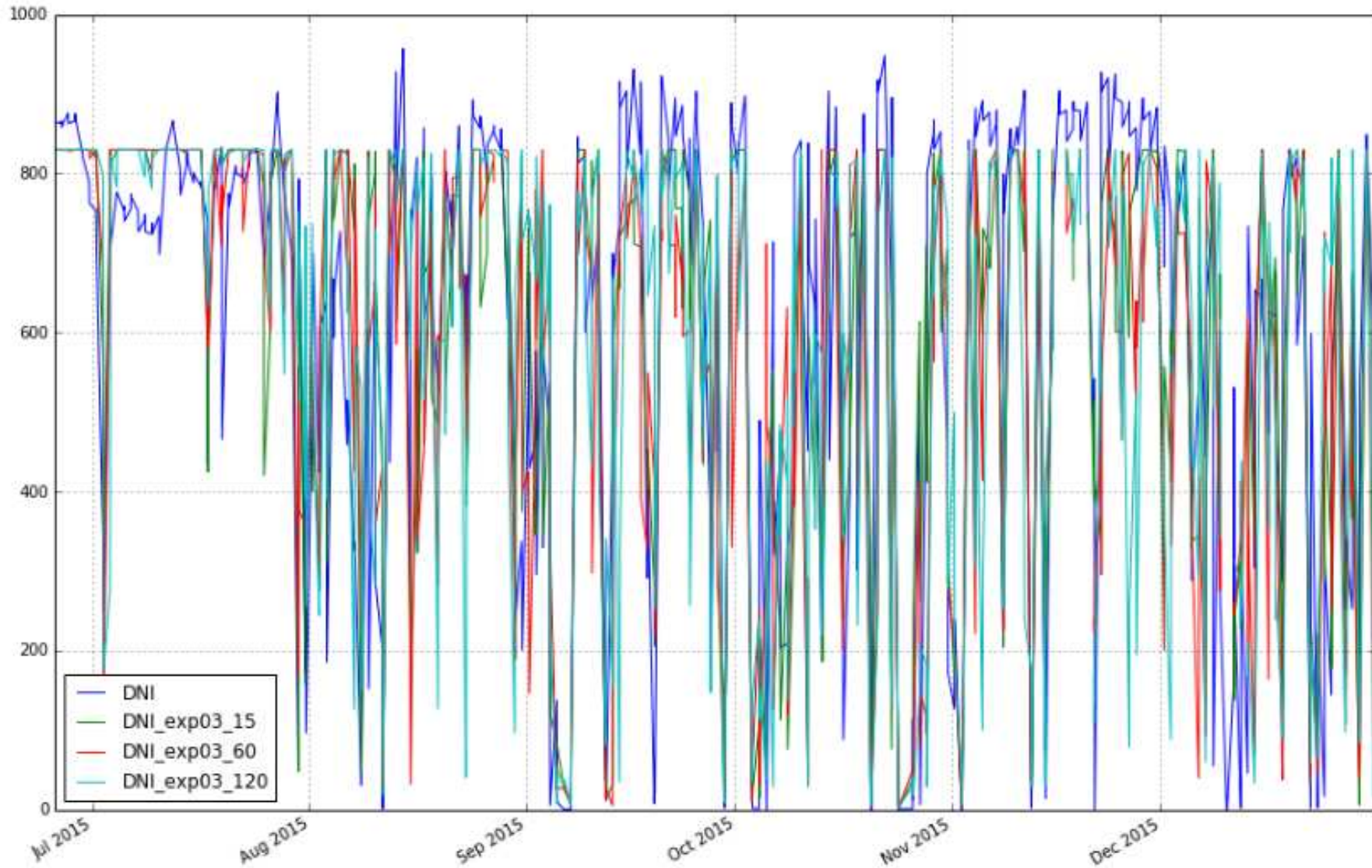


GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

Murcia, DNI observada y prevista según la función gaussiana a 15, 60 y 120 minutos.  
No estacionalidad. Bias negativo.



## Acumulaciones horarias previstas: conclusiones

Los resultados obtenidos en la validación del prototipo de predicción satelital según el enfoque utilizado sugieren:

- Estratificación de la **calibración por meses** para representar la estacionalidad.
- Utilizar **más años** en el entrenamiento incluir más variabilidad.
- Calibración por **estaciones**.

Además es necesario **introducir la dependencia de la hora del día**. Hasta el momento se han utilizado tanto en la calibración como en la validación datos entre las 11 y las 13 U.T.C.

## Nuevo enfoque en la calibración

Para cada CT se han ajustado los valores de radiación observados con la altura solar representada por el **coseno del ángulo cenital solar** → todas la horas.

- **11 funciones de ajuste** para la GHI y DNI instantáneas.
- Evitar una función del día que module la anterior calibración (orto y ocaso).
- Evitar calibraciones por meses.

Se han ensayado ajustes con **6 tipos de funciones**: lineal, exponencial, gaussiana, logarítmica, cuadrática y cúbica → Los mejores resultados se han obtenido utilizando **funciones lineales para la GHI y funciones cúbicas para la DNI**.

Entrenamiento (incluir mayor variabilidad): datos de satélite y observaciones de los años **2007-2014**. Los resultados se han comparado con **observaciones del 2015**.

Información de satélite: promedios en ventanas de **3 x 3 píxeles** y también de **5 x 5 píxeles**.

## GHI y DNI instantáneas: resultados

### BIAS corregido (para cada categoría)

GHI-lineal	9pix	25Pix	GHI-lineal	9pix	25Pix
BIAS	-5,80	-6,0	BIAS	0	0
RMSE	95,87	95,12	RMSE	95,66	94,90

DNI-cúbica	9pix	25Pix	DNI-cúbica	9pix	25Pix
BIAS	-36,36	-36,90	BIAS	0	0
RMSE	167,85	164,37	RMSE	162,34	158,62

Anterior enfoque: RMSE del orden de 185 para la GHI y de 200 para la DNI.  
Ligera mejora utilizando cajas de 5 x 5 píxeles, mas notoria en la DNI.

→ A partir de ahora resultados utilizando cajas de 5 x 5 píxeles

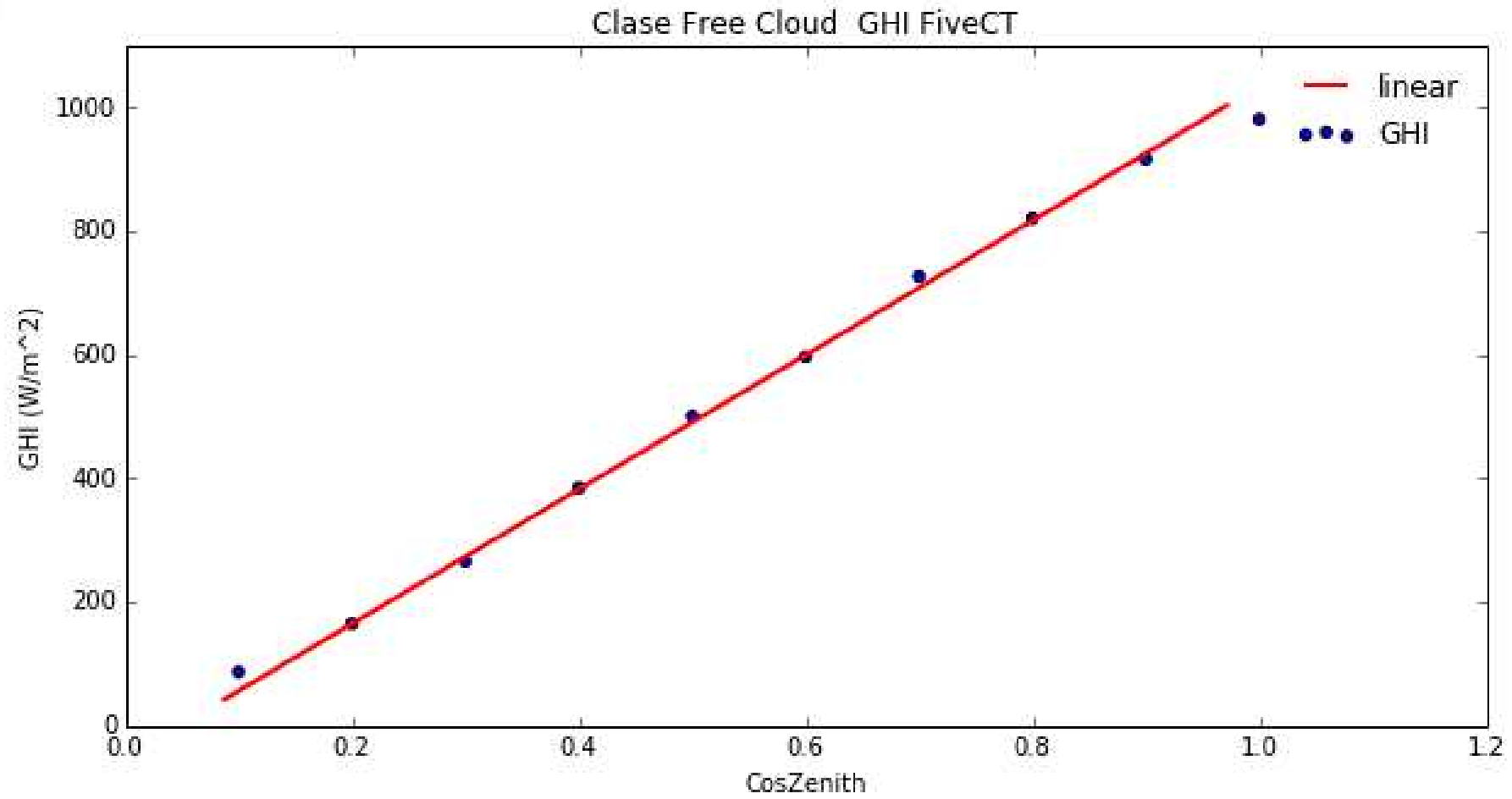


# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. cosZ Cielo despejado.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

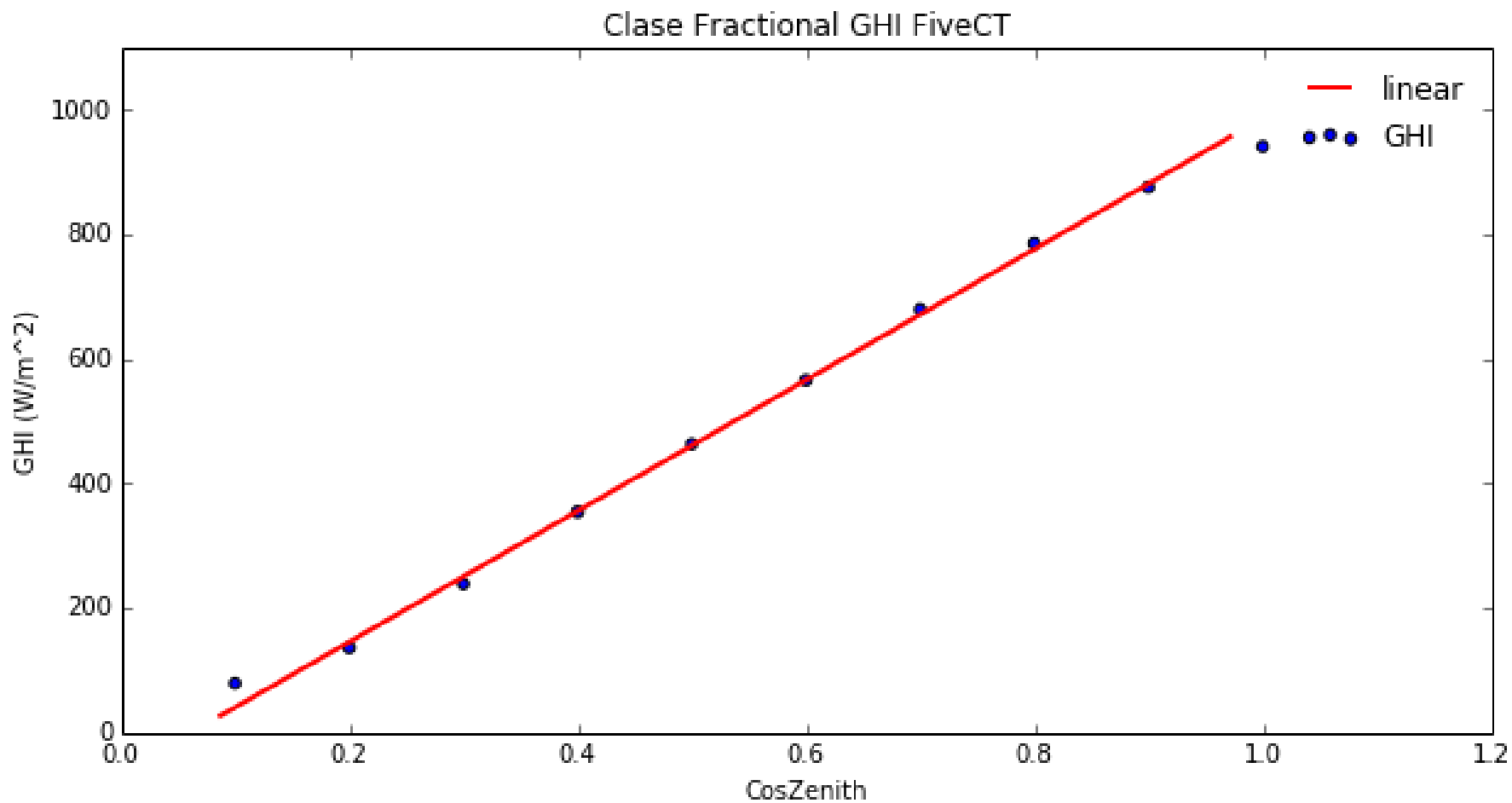


# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. cosZ Nubes fraccionales



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

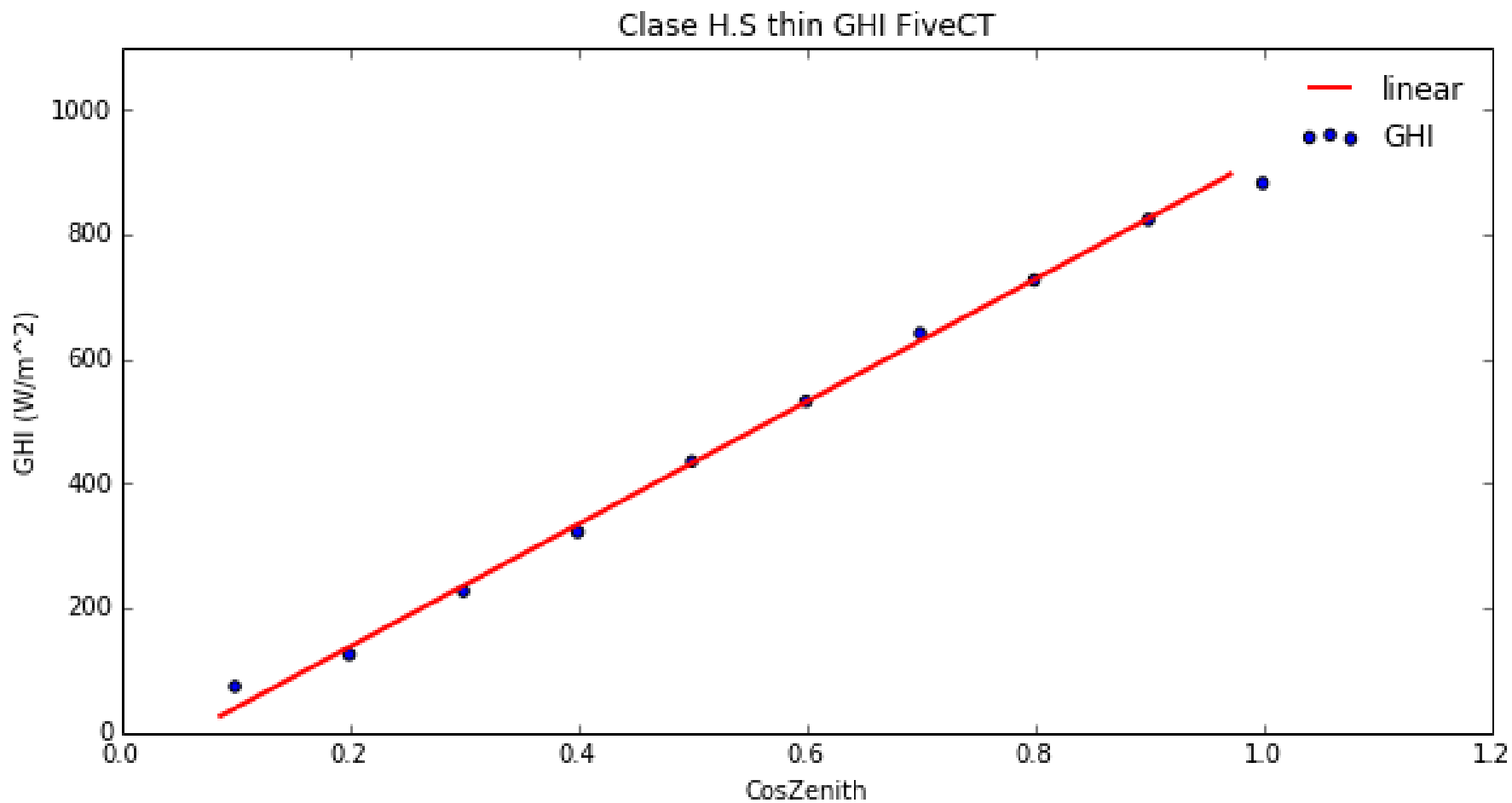


# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes delgadas.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

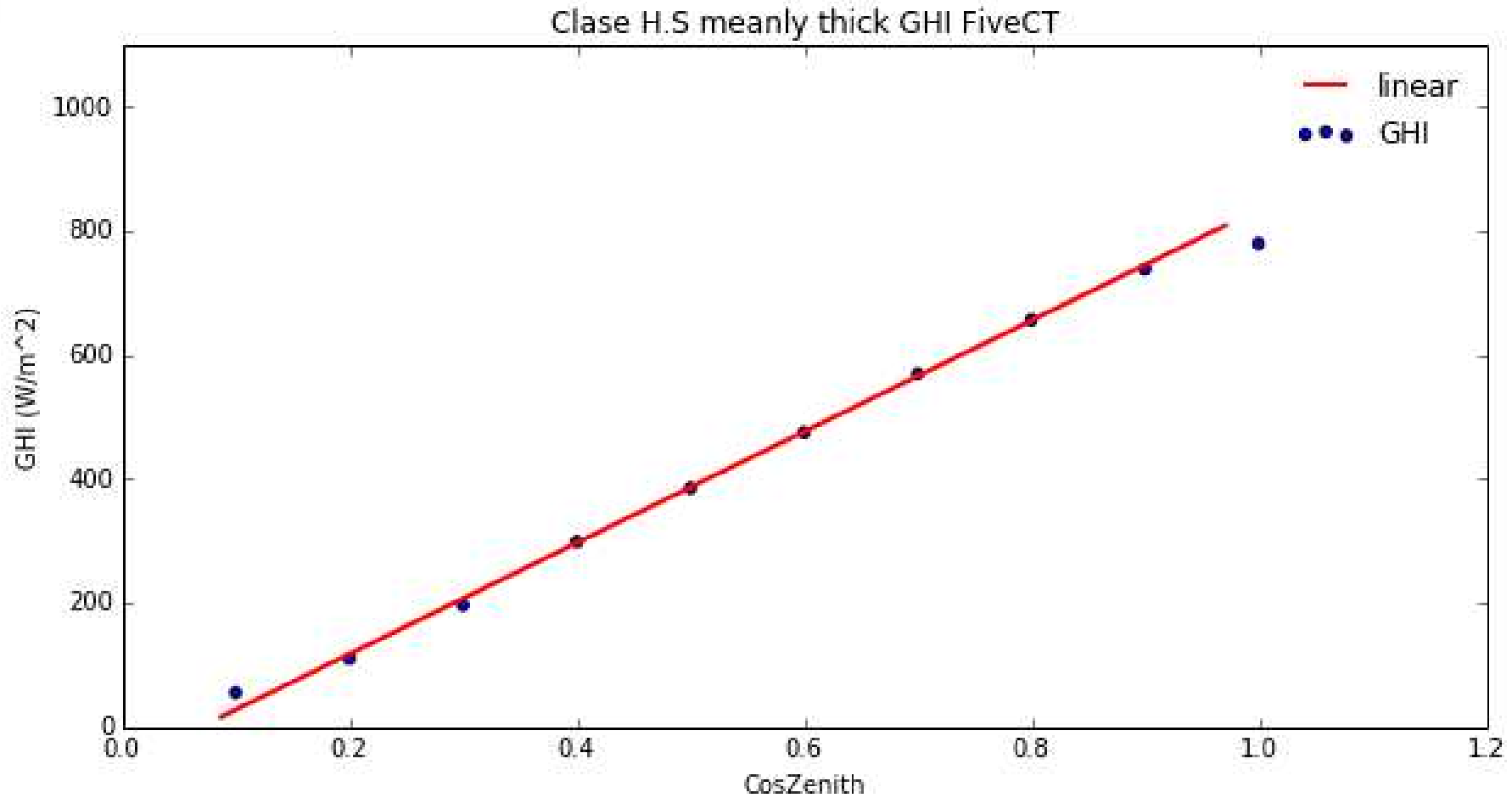


# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes principalmente espesas.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



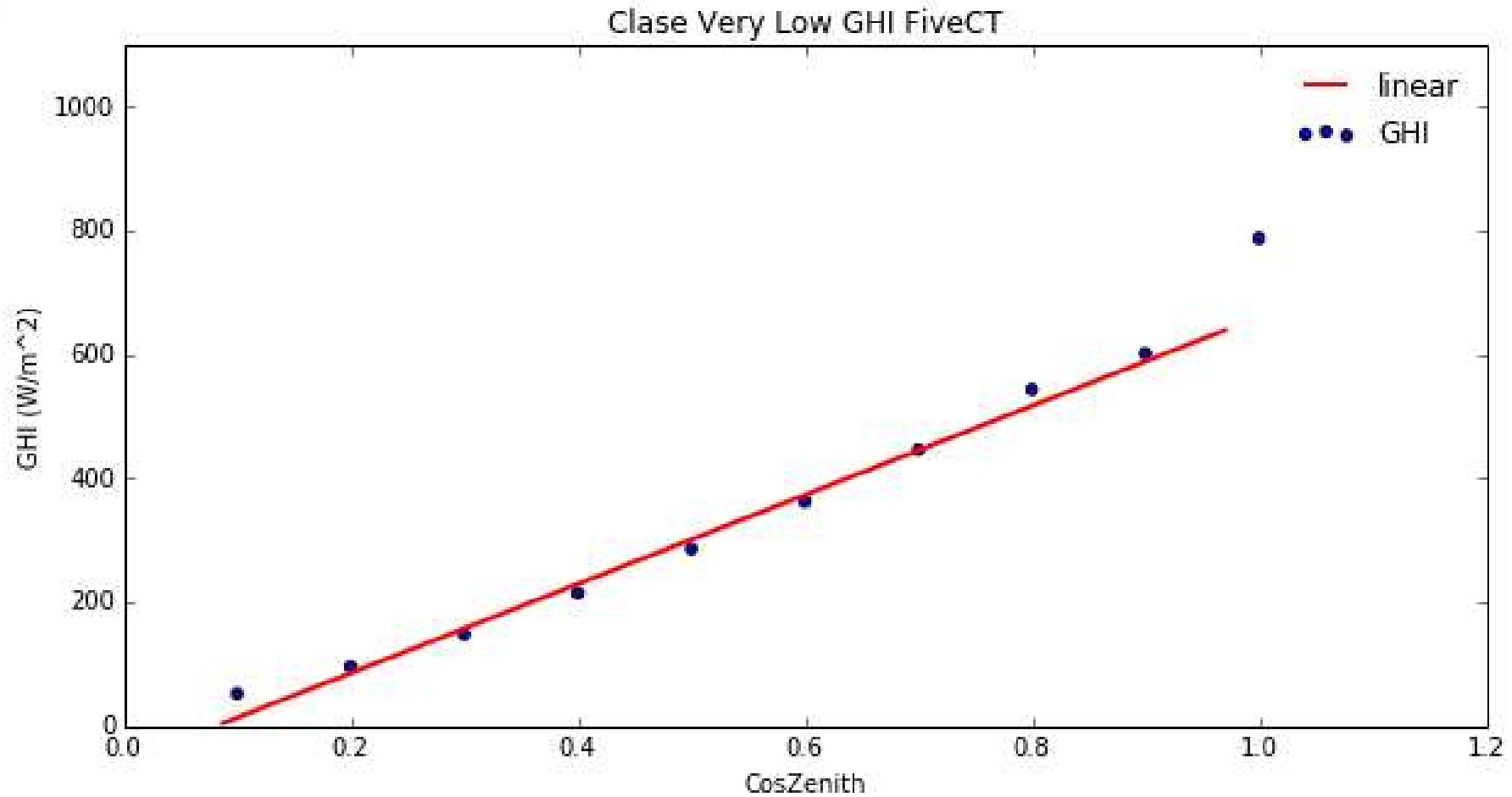
Ajuste lineal de la GHI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Muy bajas.



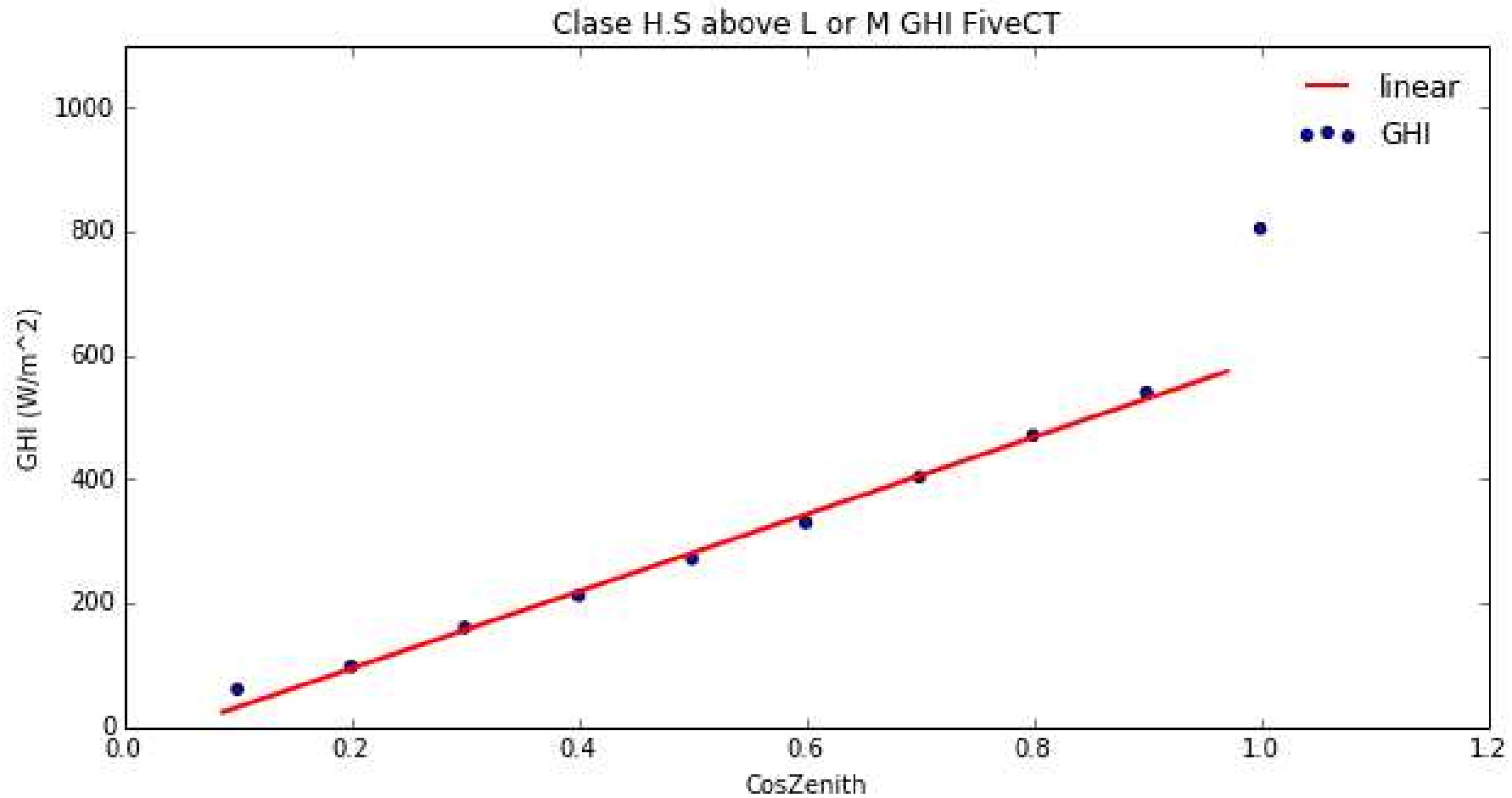
GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

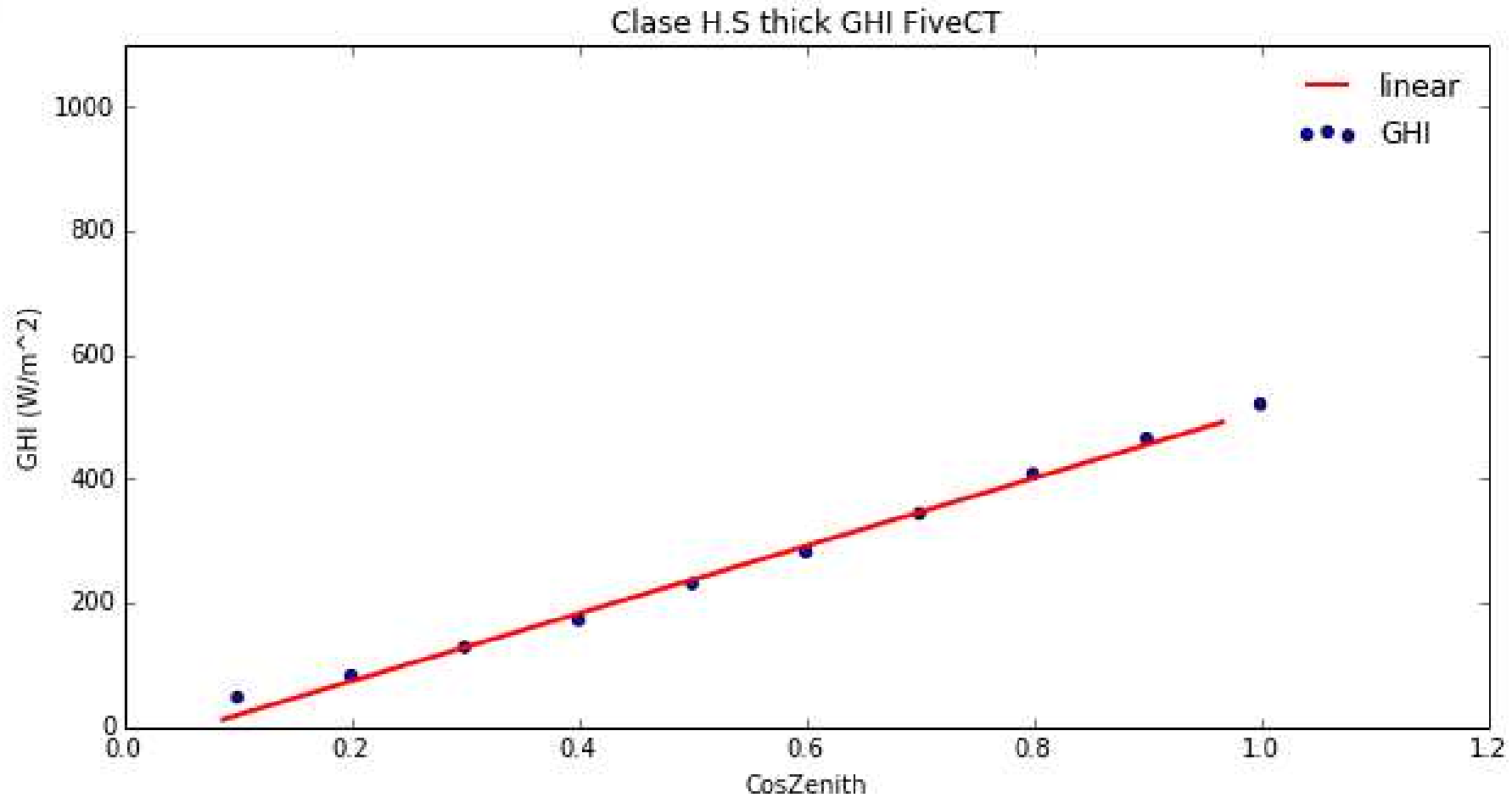
AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología



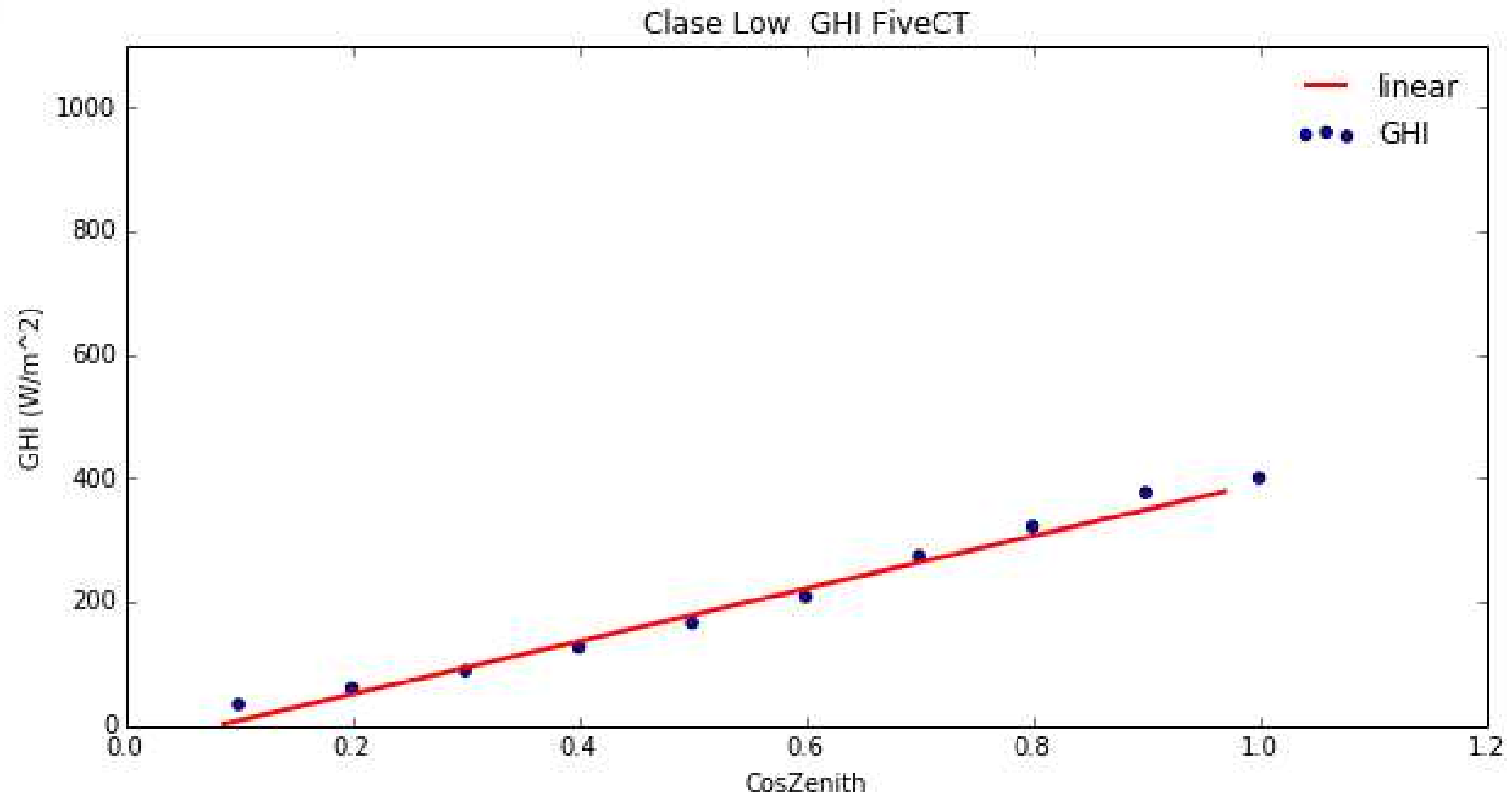
Ajuste lineal de la GHI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Altas semitransparentes sobre bajas o medias.



# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes espesas.

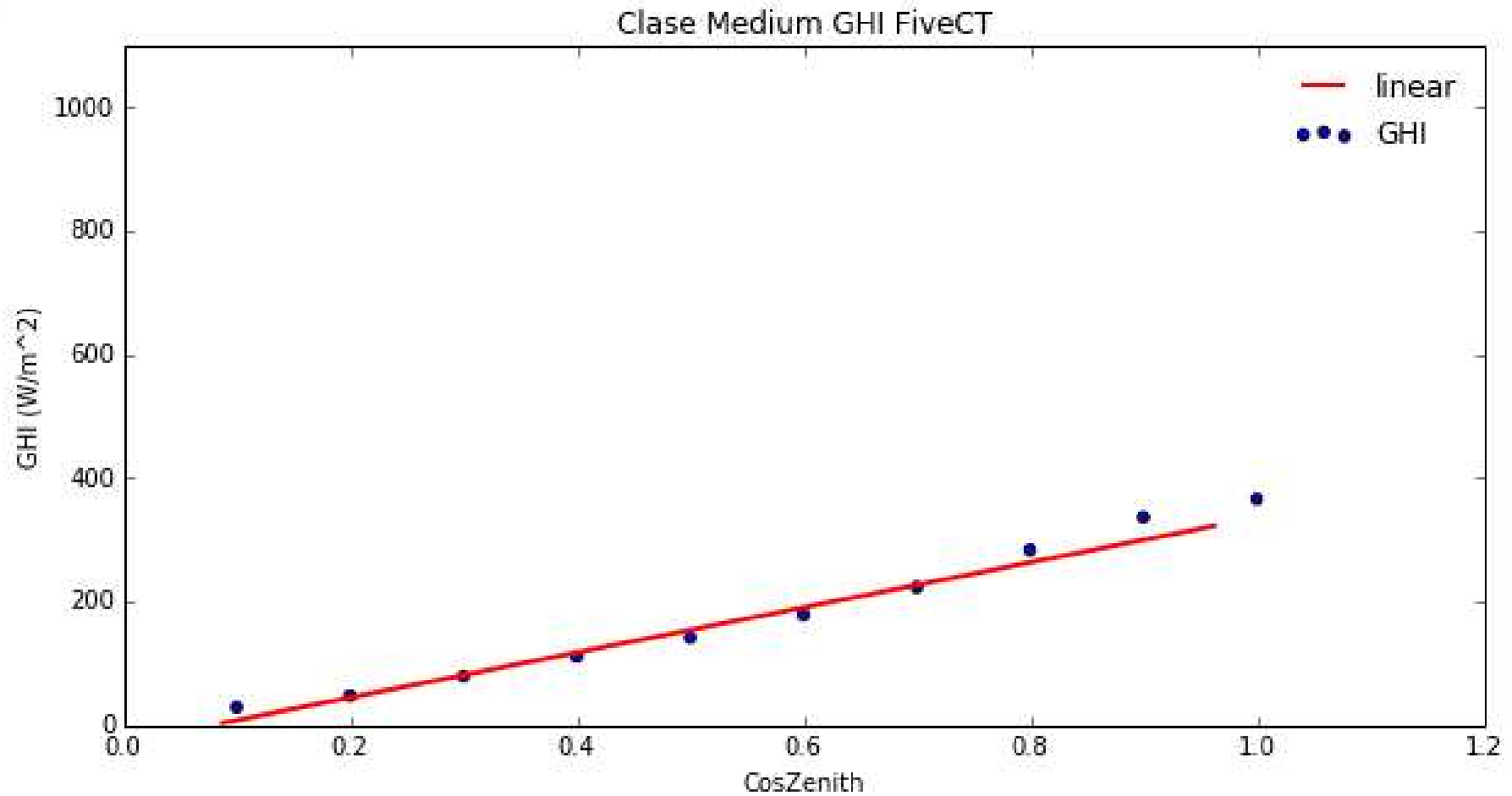


# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. cosZ. Bajas.

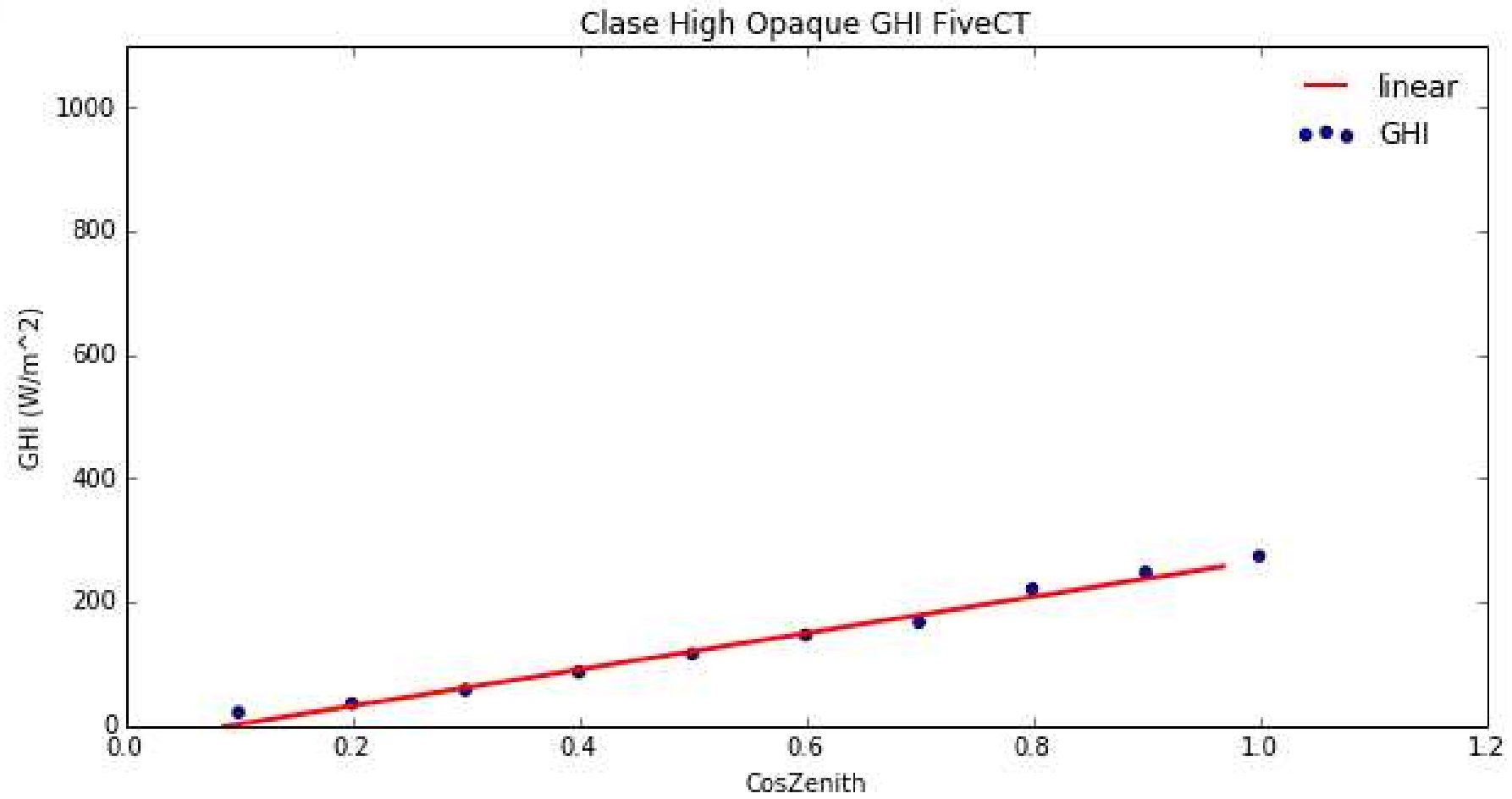




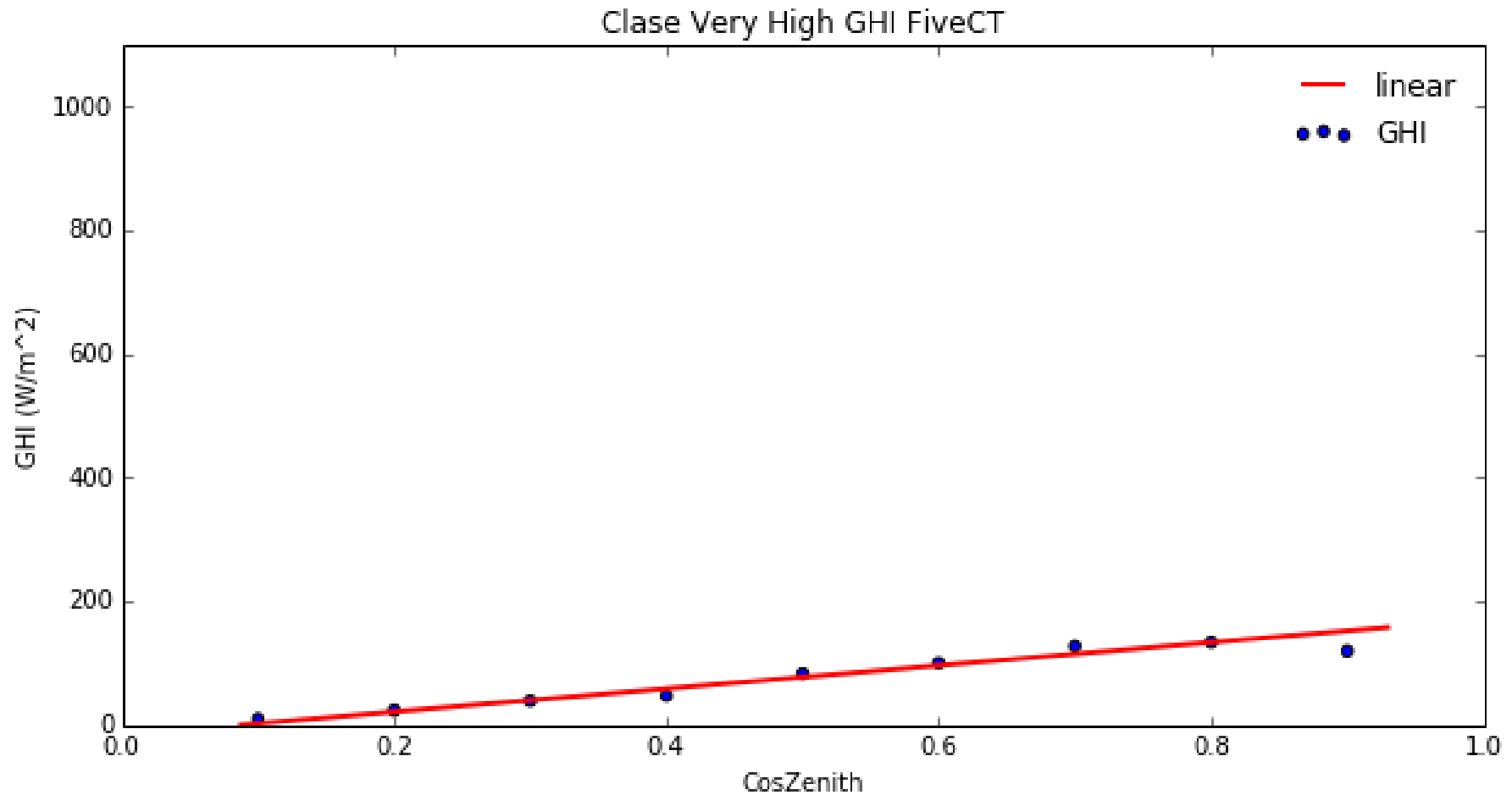
# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. $\cos Z$ . Medias.



# Ajuste lineal de la GHI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas opacas.



Ajuste lineal de la GHI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Muy altas y opacas.

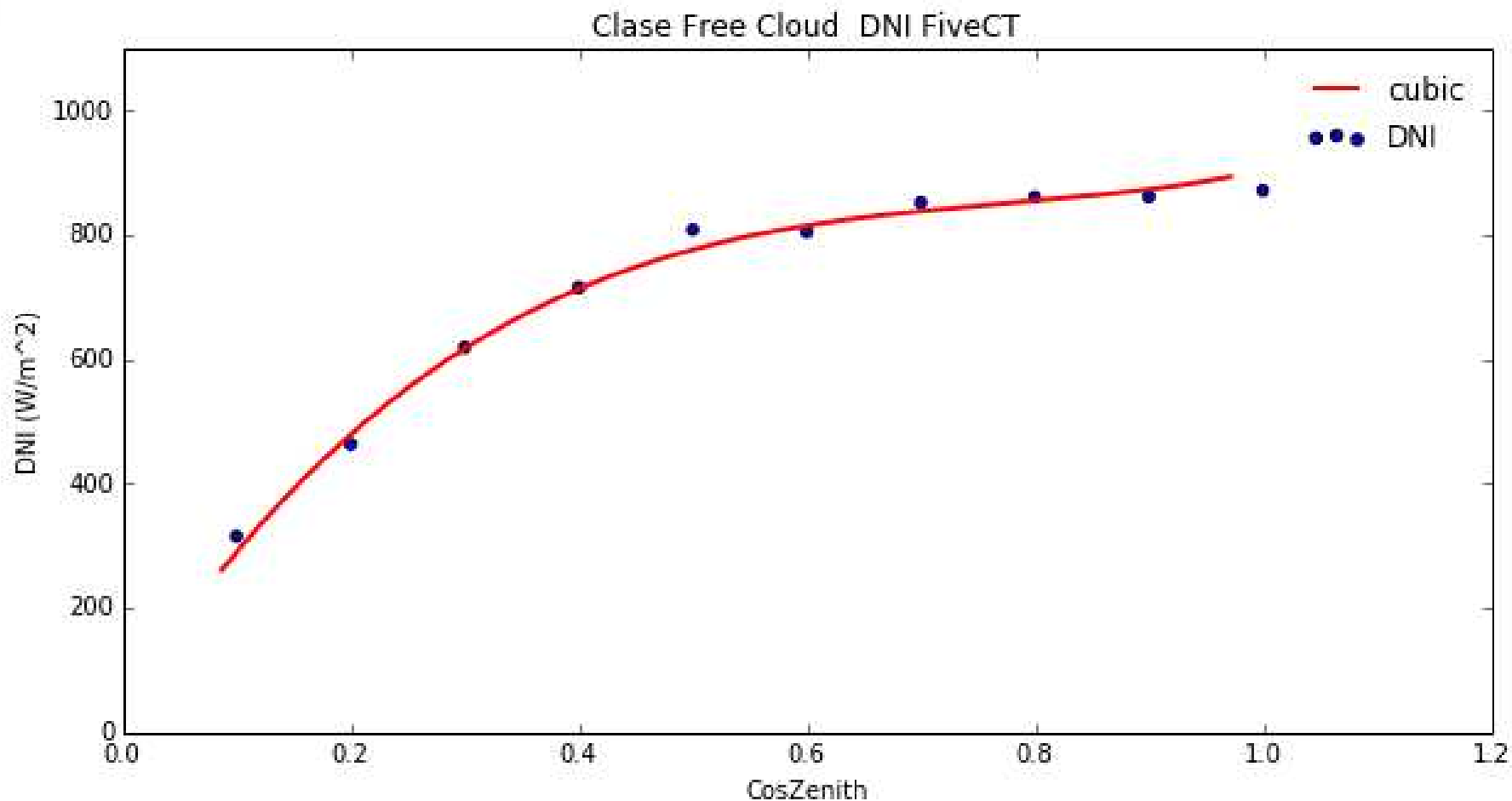


# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Cielo despejado.

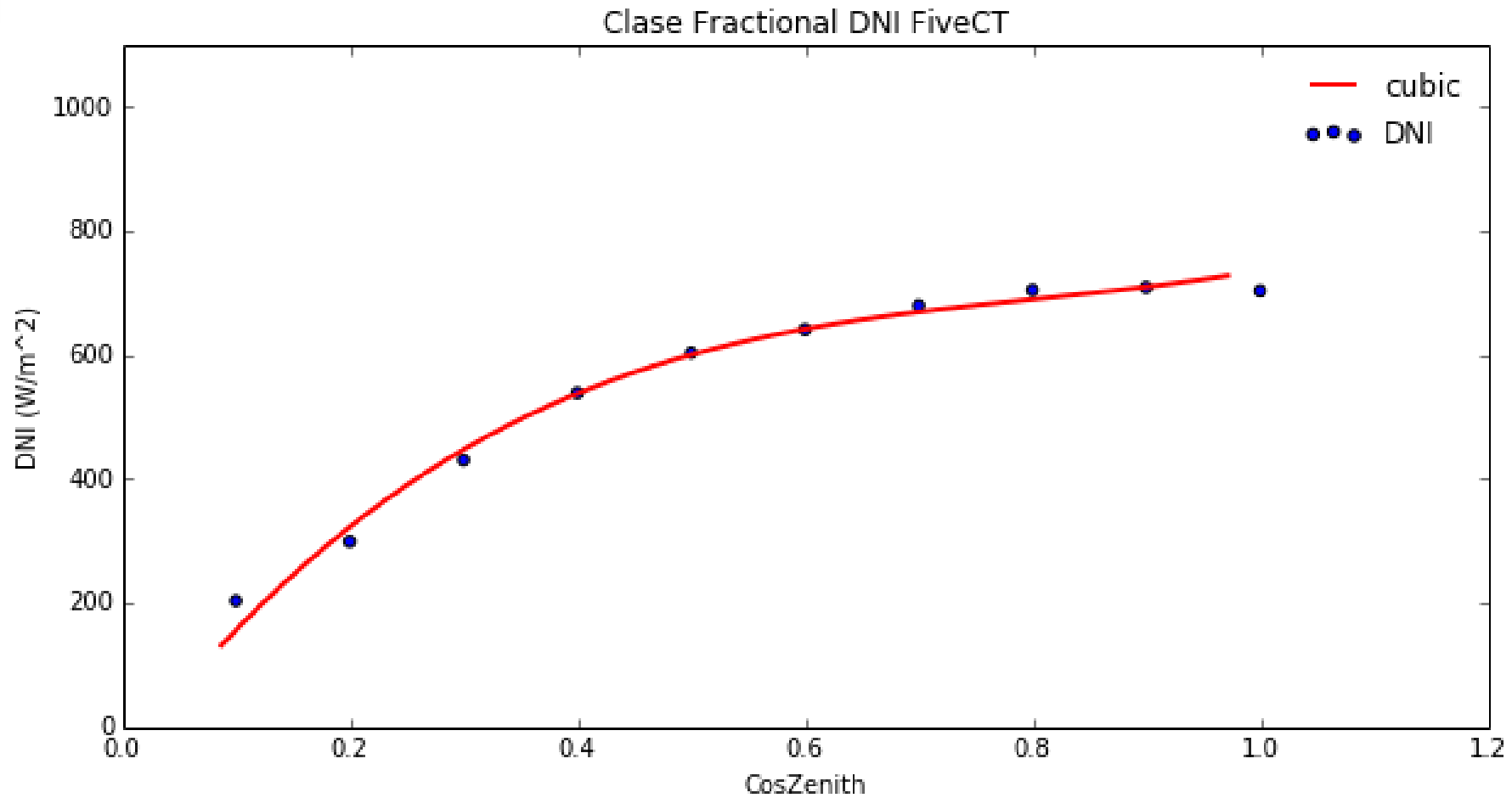


GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Nubes fraccionales

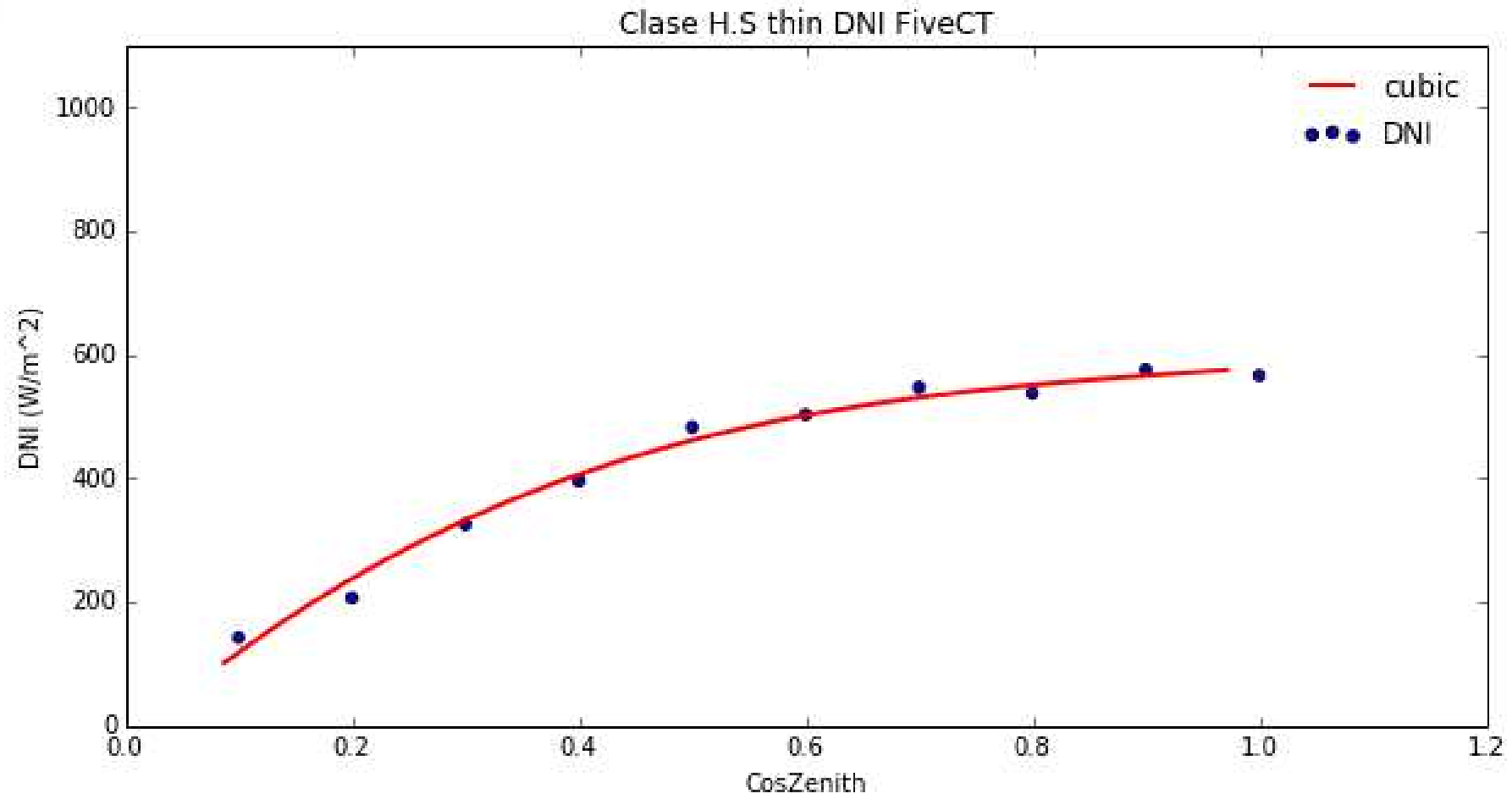


# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes delgadas.

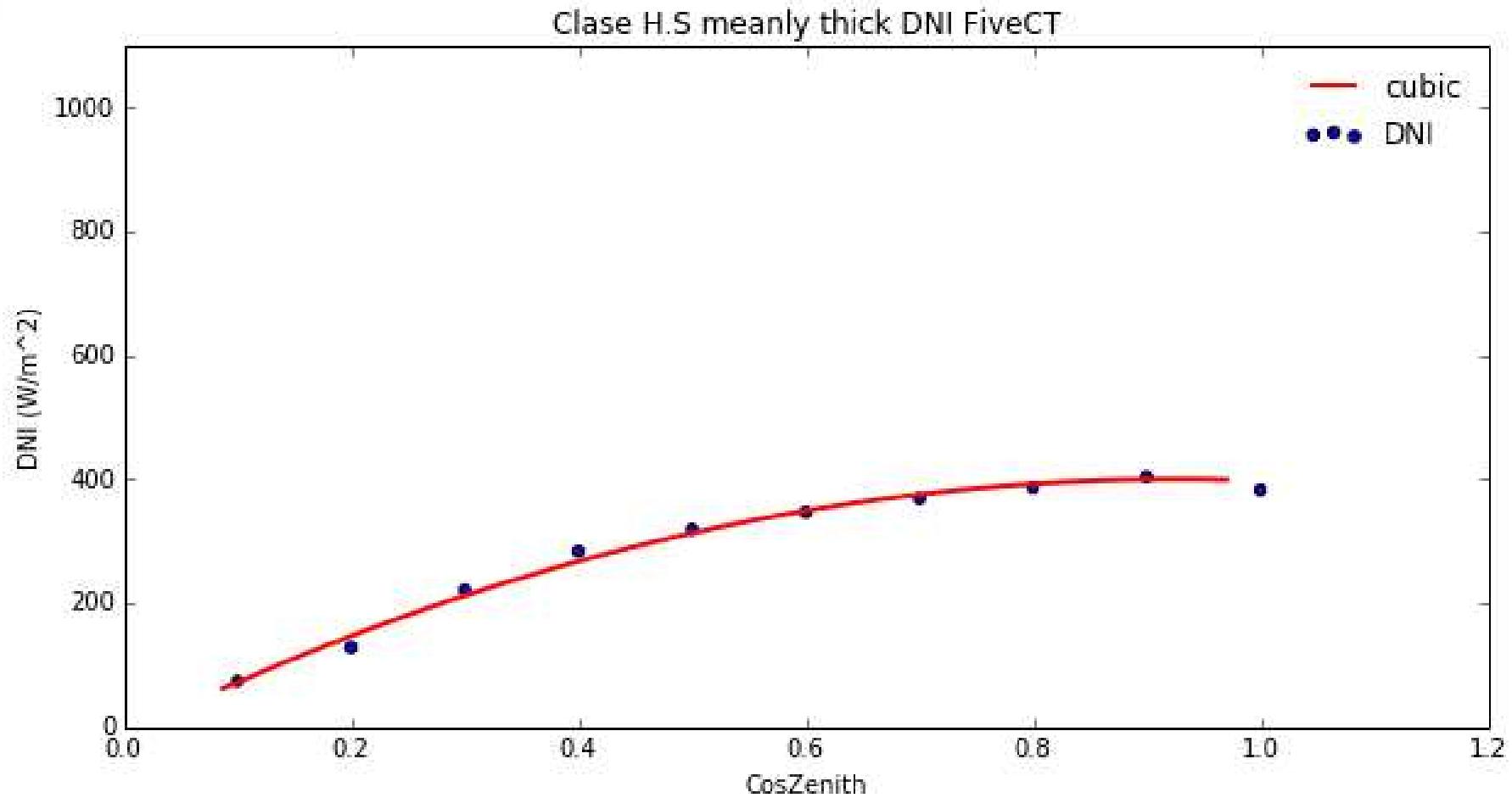


GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Altas semitransparentes principalmente espesas.

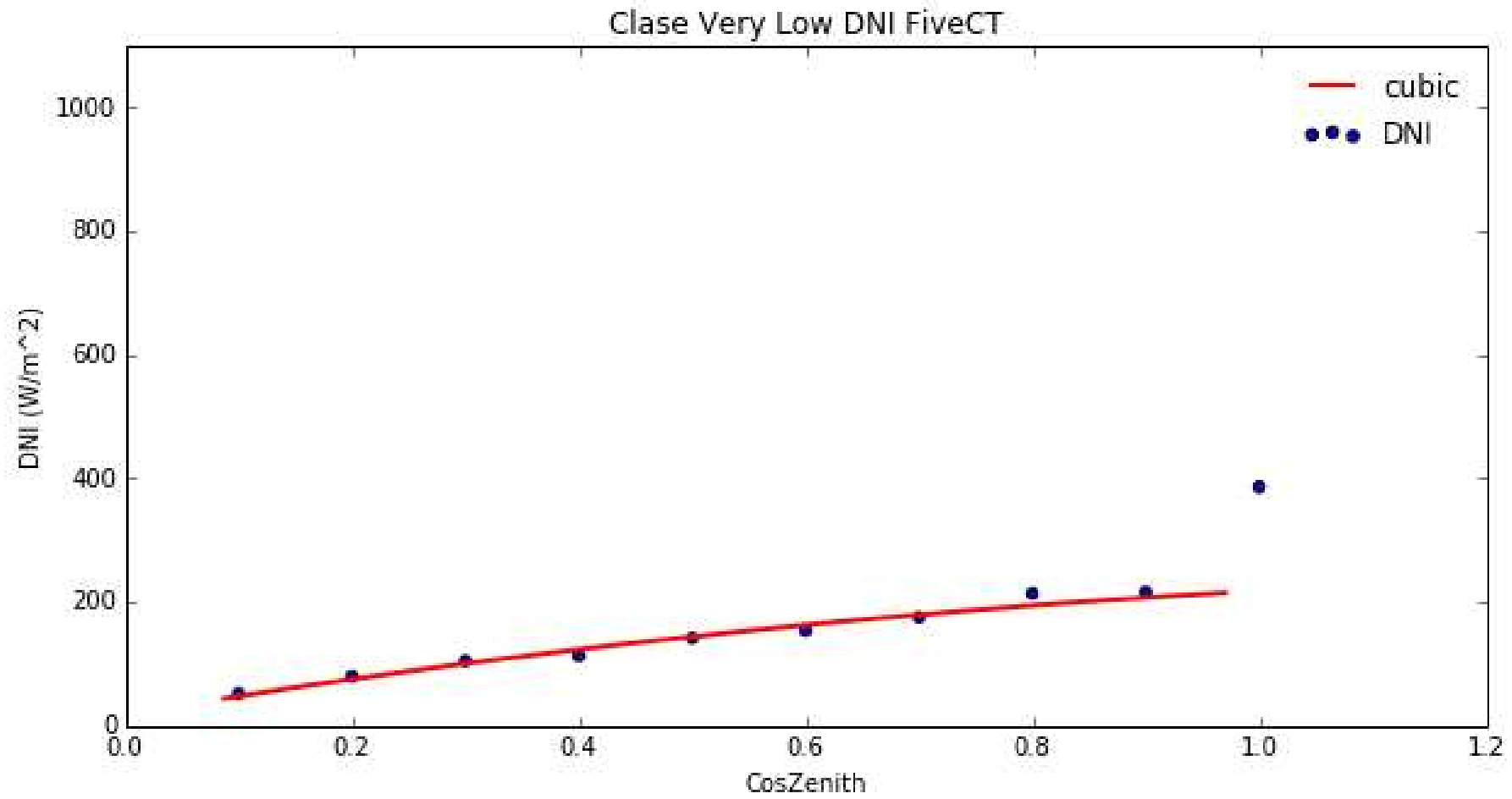


Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Muy bajas.



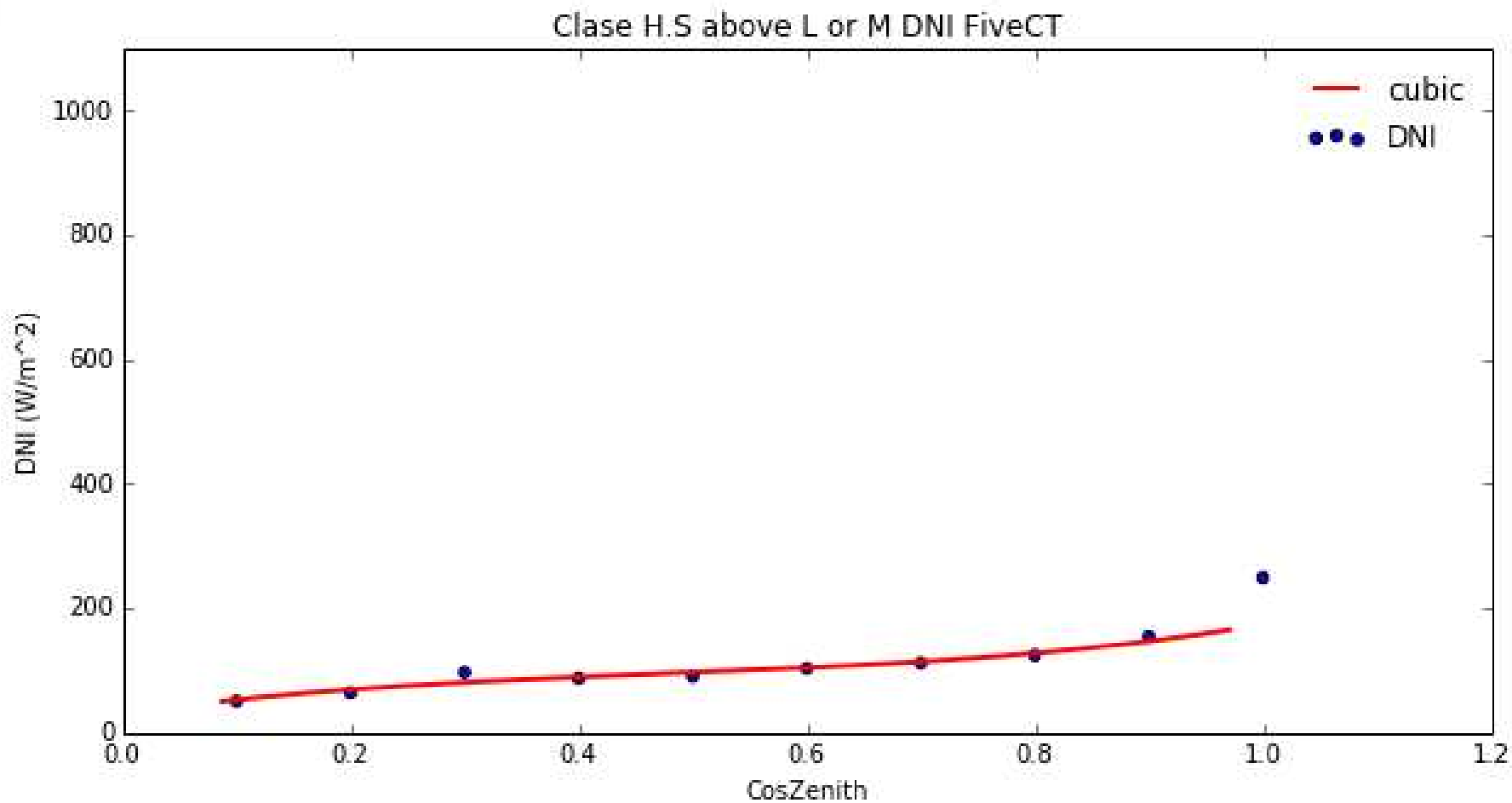
GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE





# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes sobre bajas o medias.

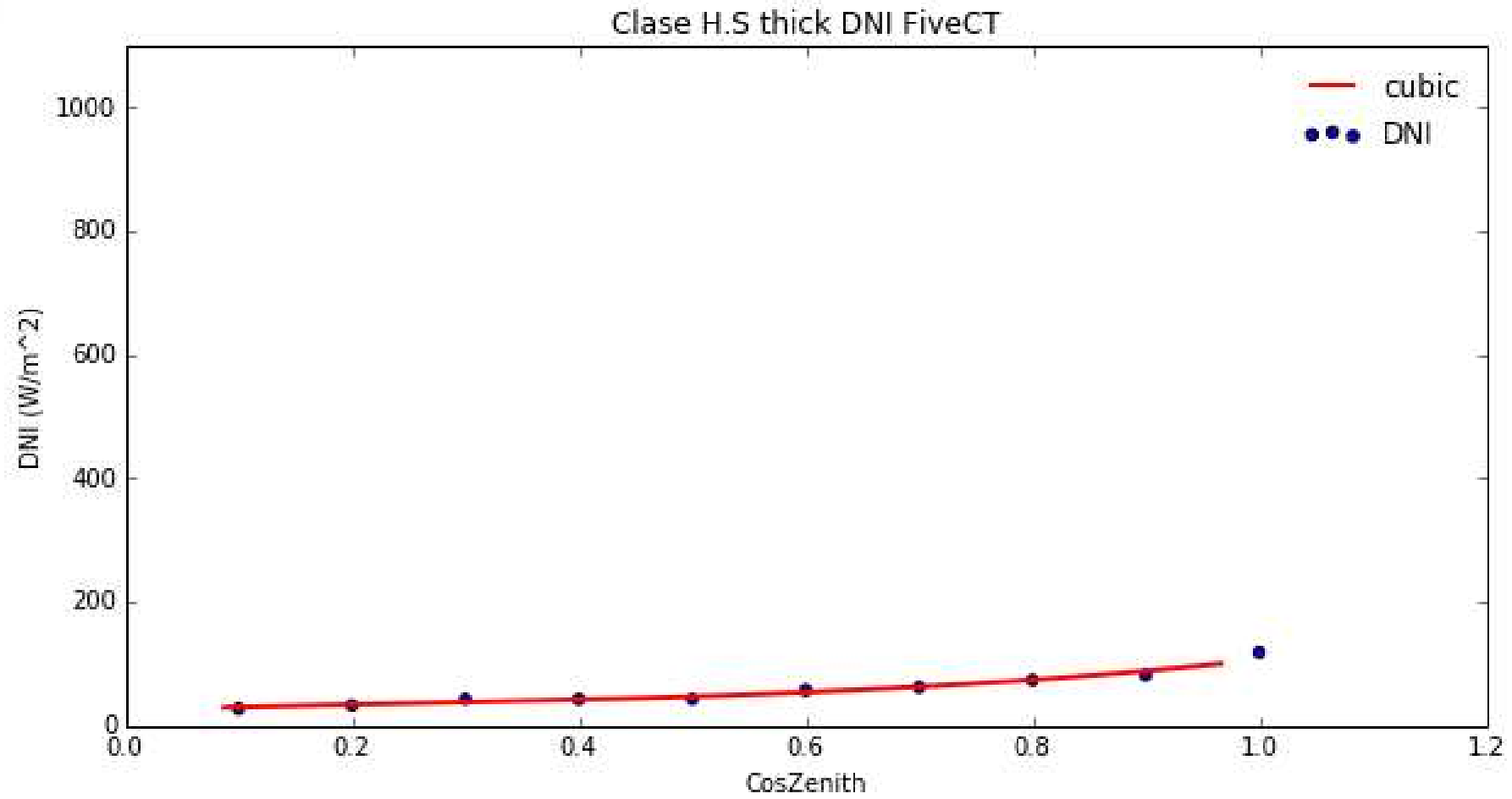


# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas semitransparentes espesas.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

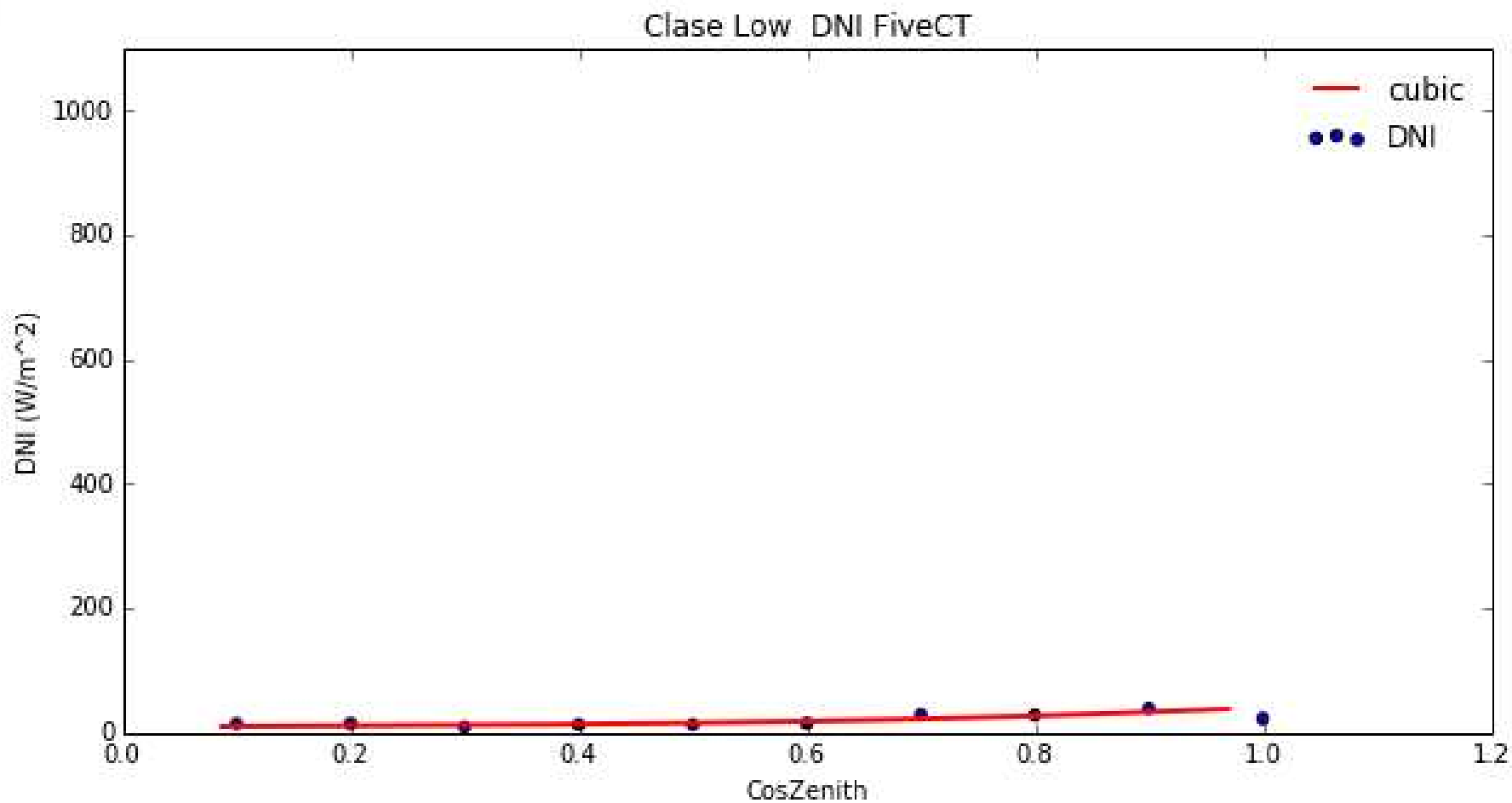


# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Bajas.

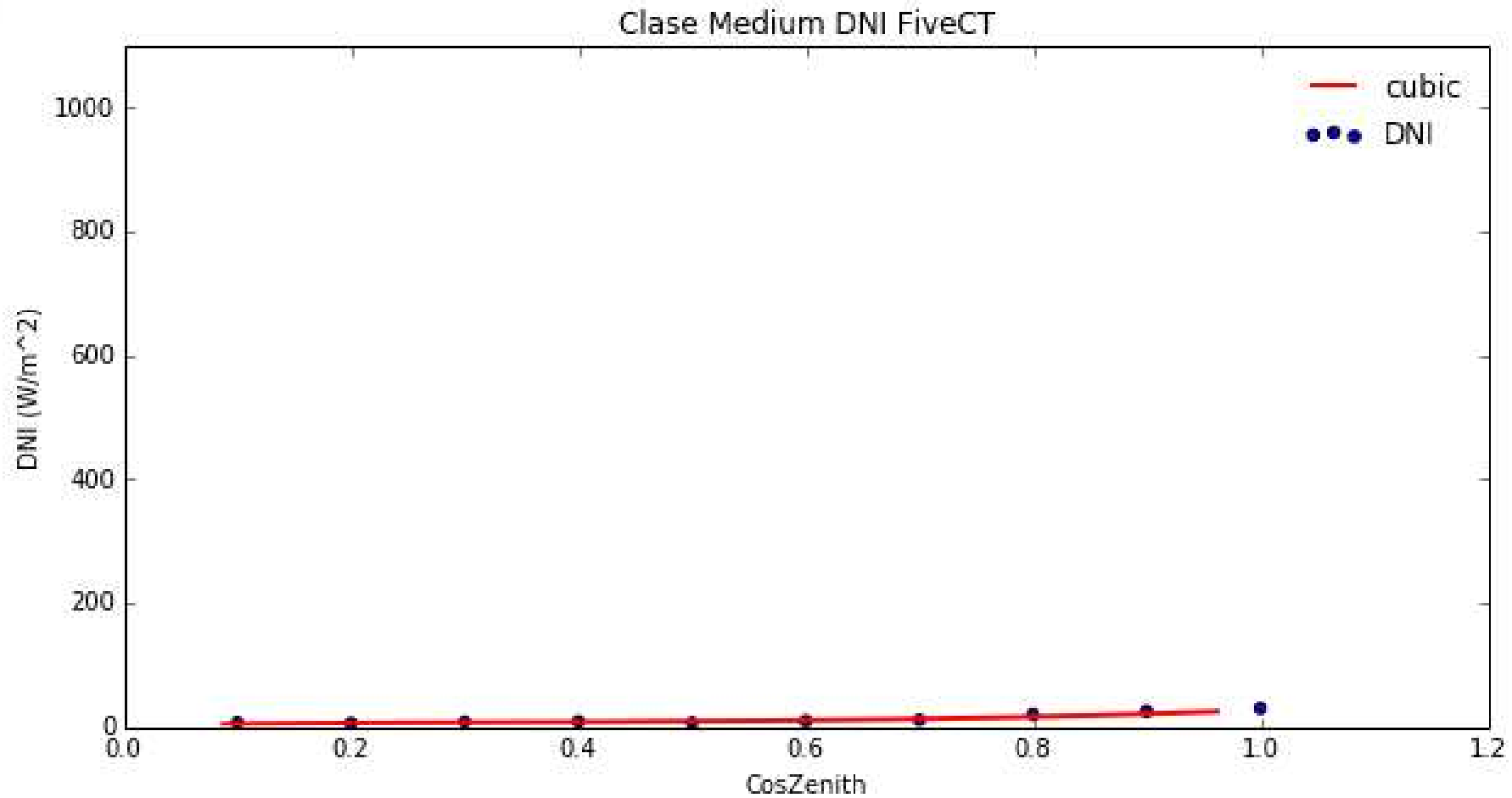


GOBIERNO  
DE ESPAÑA

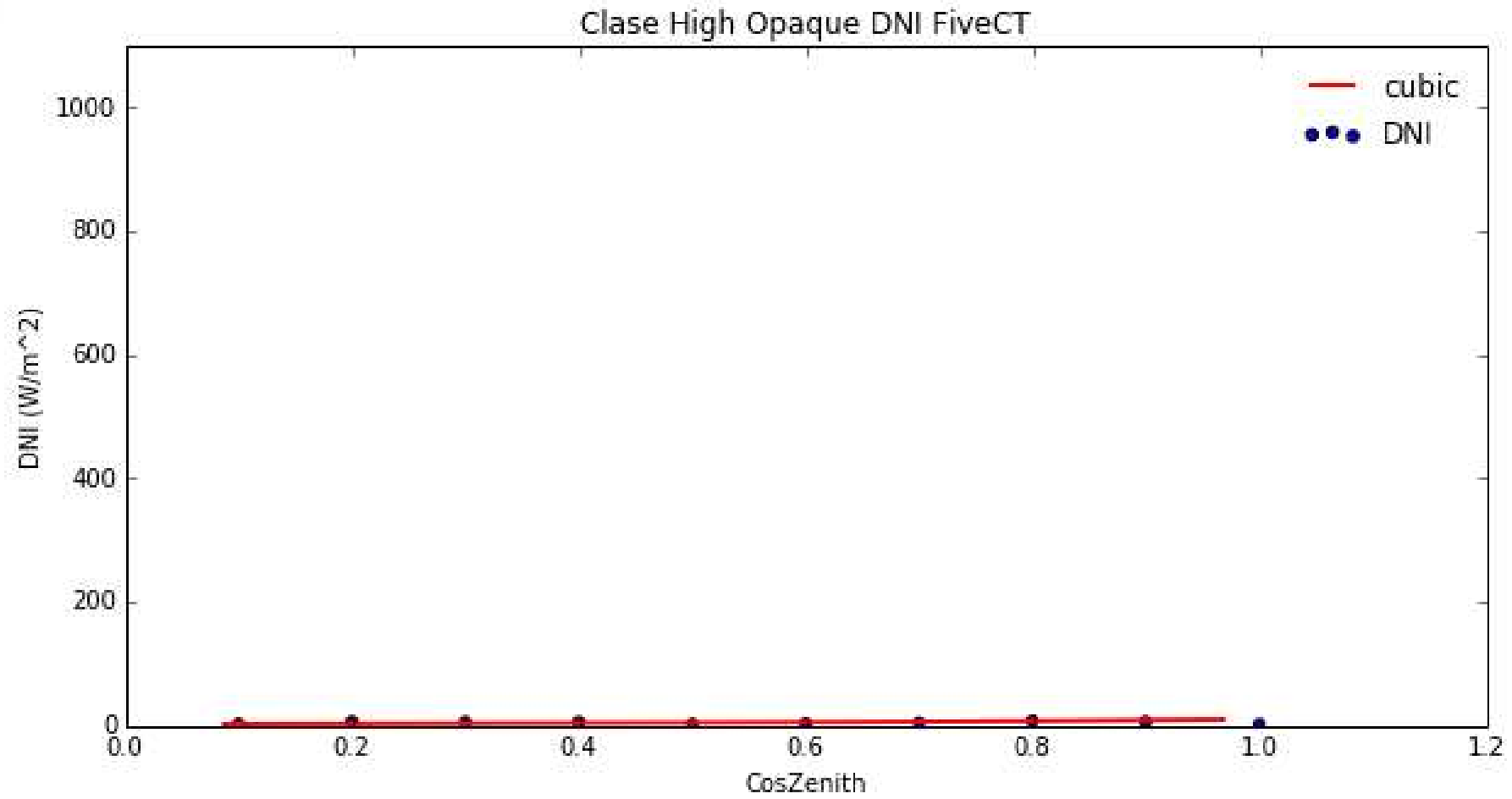
MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE



# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Medias.



# Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs. $\cos Z$ . Altas opacas.



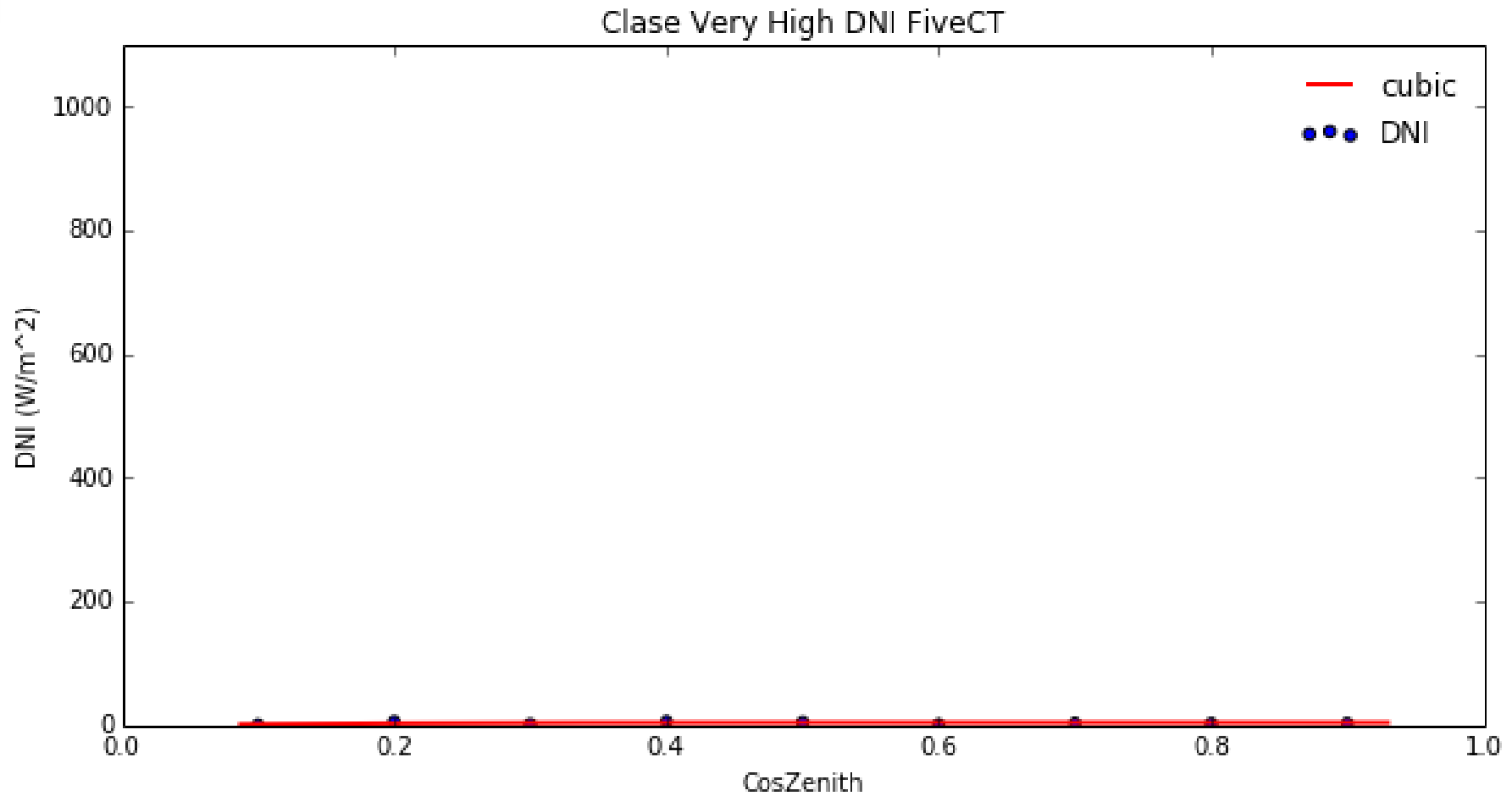
Ajuste cúbico de la DNI instantánea vs.  $\cos Z$ .  
Muy altas y opacas.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología





## GHI y DNI acumuladas observadas satélite

CT + cosZ → GHI y DNI instantáneas con funciones de ajuste lineales y cúbicas con la corrección de BIAS aplicada.

Algoritmo de acumulación → GHI y DNI horarias observadas.

Promedios en ventanas de 5 x 5 píxeles.

Validación con observaciones del año 2015 completo.

GHI hor. CT	Global	Murcia	Arenosillo
BIAS	-0,40	2,12	-9,7
RMSE	79,12	80,58	66,23

DNI hor. CT	Global	Murcia	Arenosillo
BIAS	-2,95	14,71	-4,60
RMSE	127,63	146,93	121,62

RMSE menor que para instantáneas (94,9 para la GHI 158,62 para la DNI) y mayor o menor que el global según estación.

BIAS global negativo y muy bajo → cambia de signo según estación.

## GHI acumulada prevista por el satélite

EXIM +  $\cos Z$  → GHI y DNI con funciones de ajuste lineales y cúbicas con la corrección de BIAS aplicada.

Algoritmo de acumulación → GHI y DNI horarias previstas.

Promedios en ventanas de 5 x 5 píxeles.

Validación con observaciones de 2015-16 .

GHI.prev	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
15 min	6,53	84,65	499,84	17%
60 min	3,29	105,15	500,47	21%
120 min	-1,13	125,75	501,09	25%
180 min	-5,95	139,48	501,19	28%
240 min	-9,32	150,30	500,74	30%

15%-30%: regiones nubosas y latitudes medias

Antes: (35%-37 %-38%-40%-42%).



## DNI acumulada prevista por el satélite

DNI.prev	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
15 min	9,72	138,06	521,96	26%
60 min	0,63	181,20	522,78	35%
120 min	-9,86	223,51	523,47	43%
180 min	-20,05	252,66	523,40	48%
240 min	-27,27	274,90	522,71	53%

25%-45%: regiones nubosas y latitudes medias

Antes: (33%-40%-45%-52%-56%)

→Mejores resultados frente a los obtenidos con la anterior metodología para todos los alcances de predicción (GHI y DNI previstas)

## GHI prevista para Murcia y Arenosillo

GHI.prev Global	BIAS	RMSE	GHI.prev Murcia	BIAS	RMSE	GHI.prev Arenosillo	BIAS	RMSE
15 min	6,53	84,65	15 min	8,85	94,39	15 min	-6,60	67,85
60 min	3,29	105,15	60 min	6,33	106,54	60 min	-11,64	83,35
120 min	-1,13	125,75	120 min	1,50	124,63	120 min	-17,87	106,98

A grandes rasgos Murcia presenta valores del RMSE algo mayores que la media sobreestimado ligeramente y Arenosillo tiene menores errores pero infraestima siempre.

## DNI prevista para Murcia y Arenosillo

DNI.prev Global	BIAS	RMSE	DNI.prev Murcia	BIAS	RMSE	DNI.prev Arenosillo	BIAS	RMSE
15 min	9,72	138,06	15 min	37,69	156,70	15 min	0,61	122,86
60 min	0,63	181,20	60 min	30,15	184,17	60 min	-12,45	156,96
120 min	-9,86	223,51	120 min	22,69	224,85	120 min	-29,50	194,79

Murcia presenta valores del RMSE algo mayores que la media sobreestimado más que para la GHI y Arenosillo tiene menores errores en la primera hora de predicción con un BIAS más ajustado al comienzo pero infraestimando luego más que la media.

→ **Diferentes comportamientos según la estación**, esto vuelve a dejar abierta la posibilidad de realizar calibraciones por estación en un futuro.

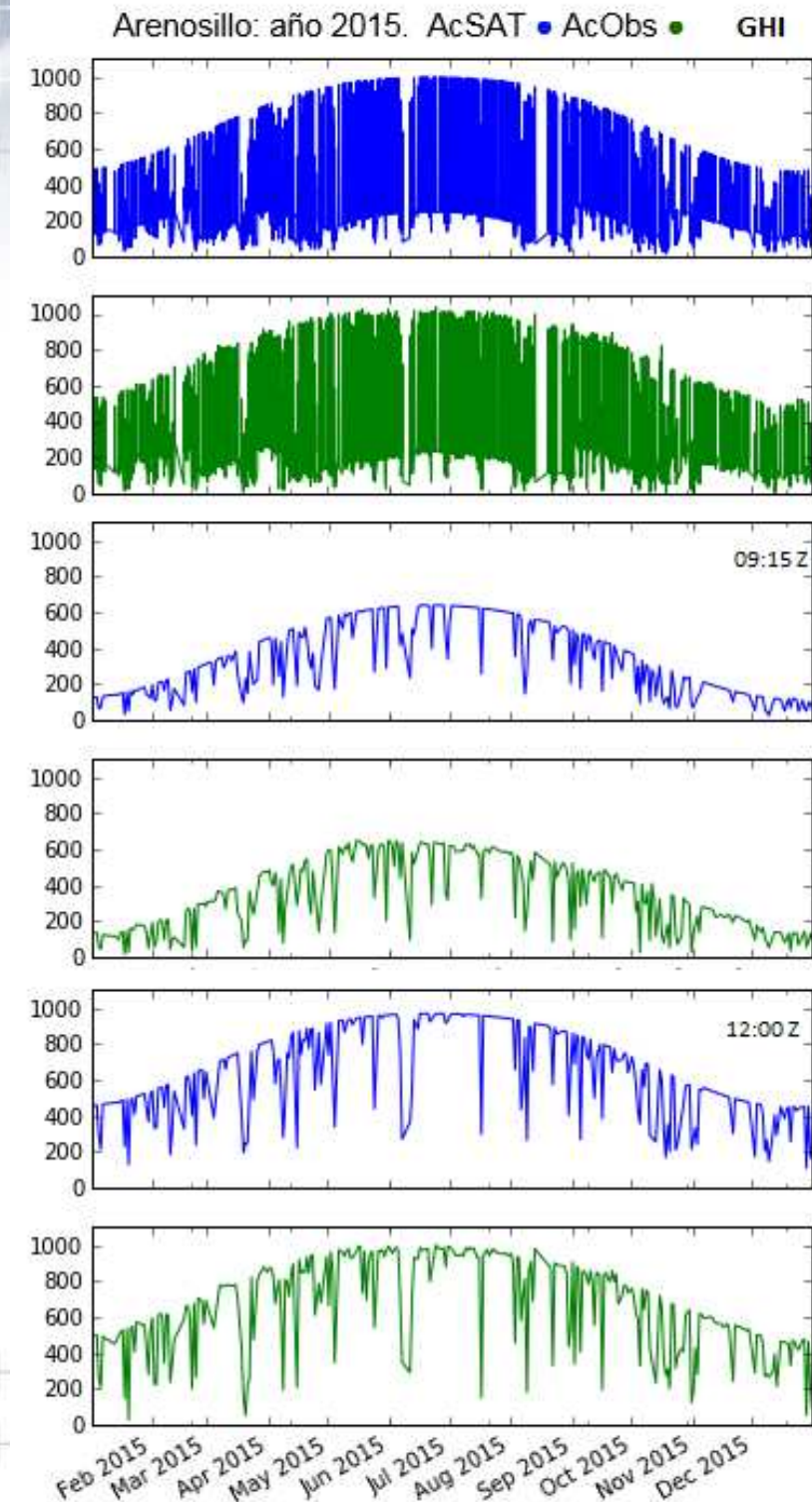
# GHI horarias observadas por el satélite: evolución anual (2015)

## Arenosillo

GHI horarias según el **satélite (azul)** para todas las horas y para las 09:15 y 12:00 UTC y las **observaciones (verde)**.

De la observación de los gráficos podemos concluir que el nuevo enfoque en la calibración **representa bien la señal y la onda anual de la radiación global**.

→ Calibración por meses no necesaria



## DNI horarias estimadas según el satélite: evolución anual (2015)

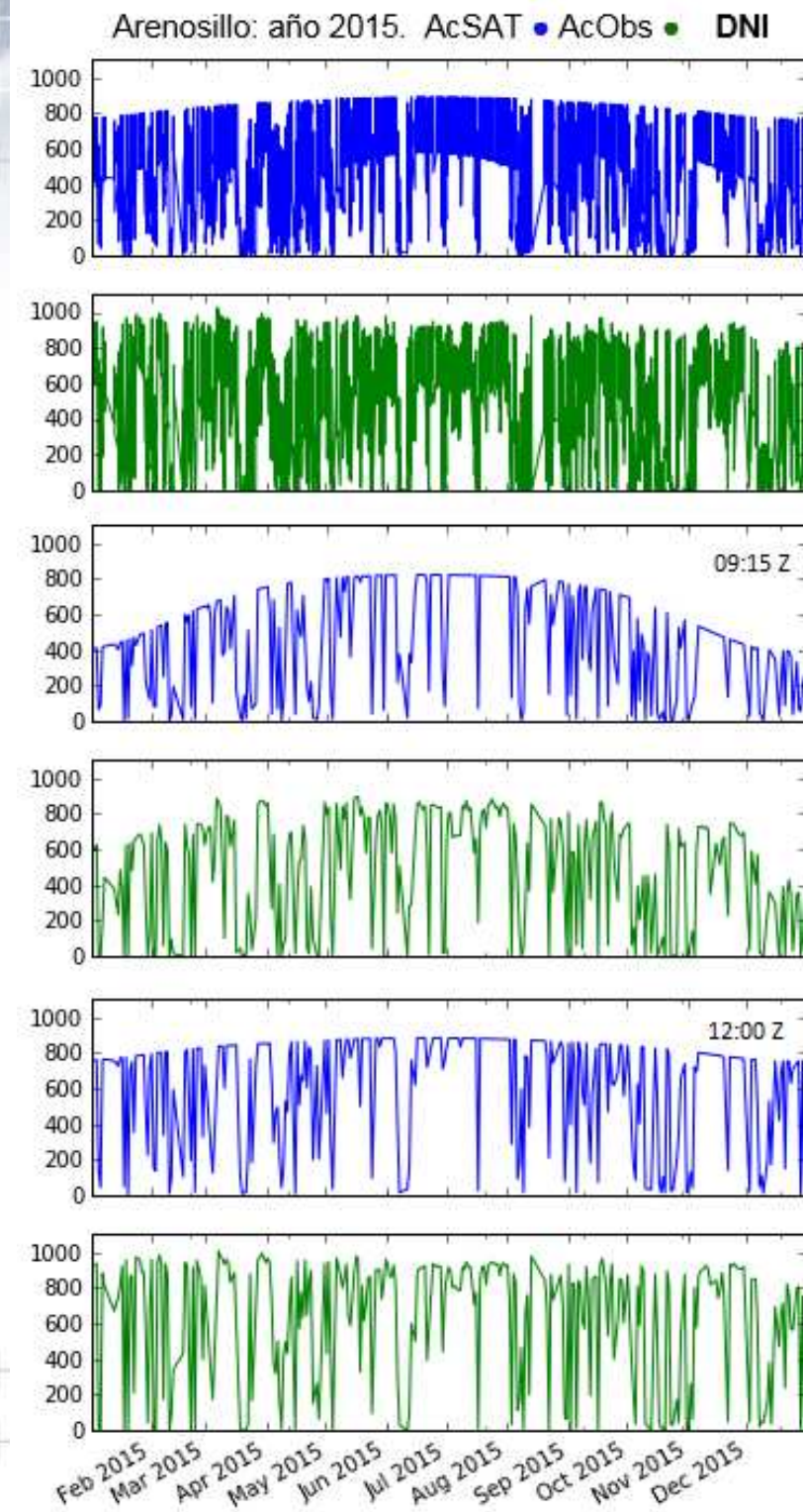
### Arenosillo

DNI horarias según el **satélite (azul)** para todas las horas y para las 09:15 y 12:00 UTC y las **observaciones (verde)**.

La **DNI** observada por el satélite **representa bien la señal de las observaciones**.

La **oscilación anual es mucho más suave que para la GHI**. Dicha evolución no se identifica bien en las observaciones.

Se observa algo **mejor** en la evolución anual de la radiación en las **primeras horas del día**.



# Modelos numéricos

Las **leyes físicas** que describen la evolución de los fenómenos atmosféricos están representadas por **ecuaciones complejas y no lineales** que no se pueden resolver analíticamente → **métodos numéricos**.

(Las leyes de conservación de energía, masa y momento y la ecuación de estado de los gases )

## Componentes de los Modelos Numéricos:

- **Asimilación de Datos:** Incorporación de las observaciones al modelo numérico

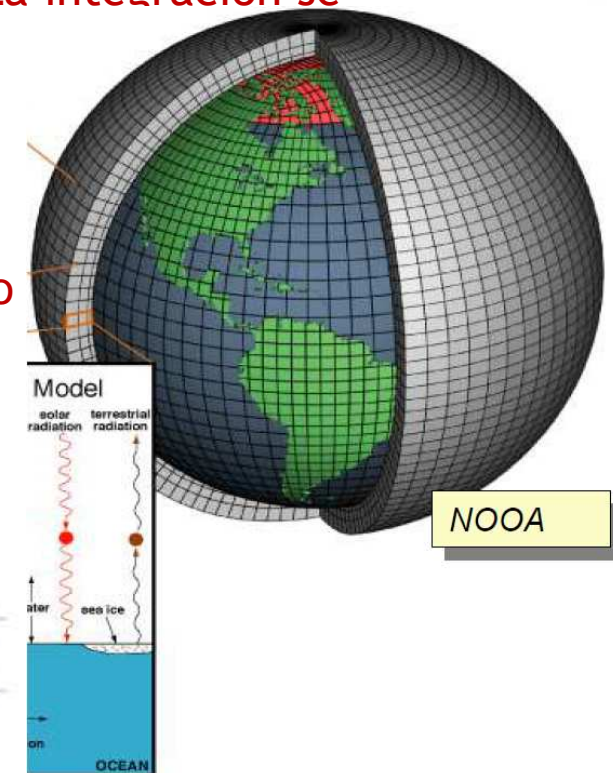
El estado inicial = combinación inteligente de una predicción previa de corto plazo y las observaciones disponibles en el mismo instante de tiempo → **La integración se inicia a partir de este estado inicial**.

- **Dinámica:**

Los modelos numéricos resuelven las ecuaciones de la dinámica atmosférica utilizando **técnicas numéricas que discretizan el espacio y el tiempo**

→ Resolución determinada por recursos computacionales.

- **Parametrizaciones Físicas:** Fenómenos a escala subrejilla.

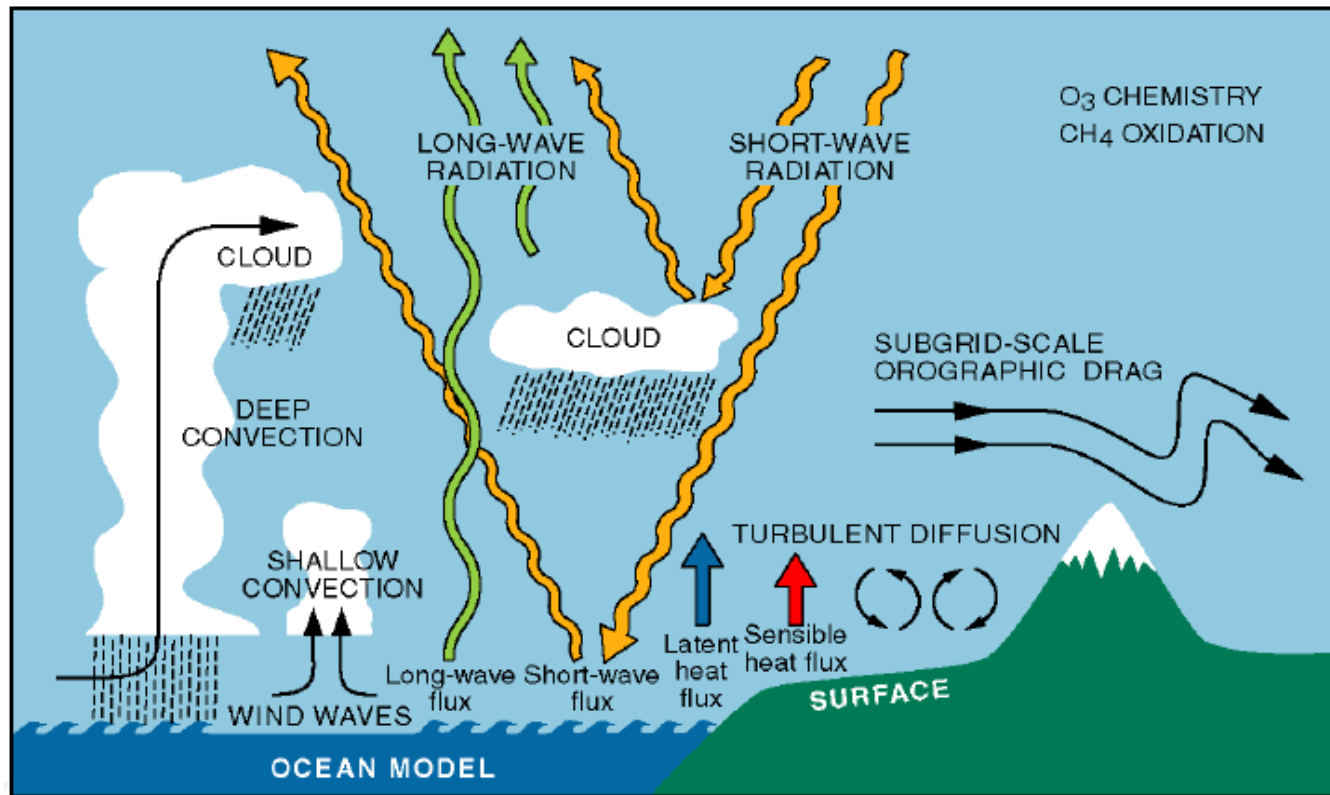


## Modelos numéricos: parametrizaciones

Parametrizaciones → representaciones estadísticas de los efectos de los procesos de escala “subrejilla” en la gran escala, a partir de las variables resueltas por el modelo.

Variables del modelo: viento, temperatura, humedad, fracción nubosa y contenido agua/hielo, lluvia, nieve, presión en superficie y ozono.

Parametrizaciones: Radiación, Superficie, Difusión vertical-Turbulencia, Procesos orográficos, Convección y Nubes-Microfísica de Nubes.

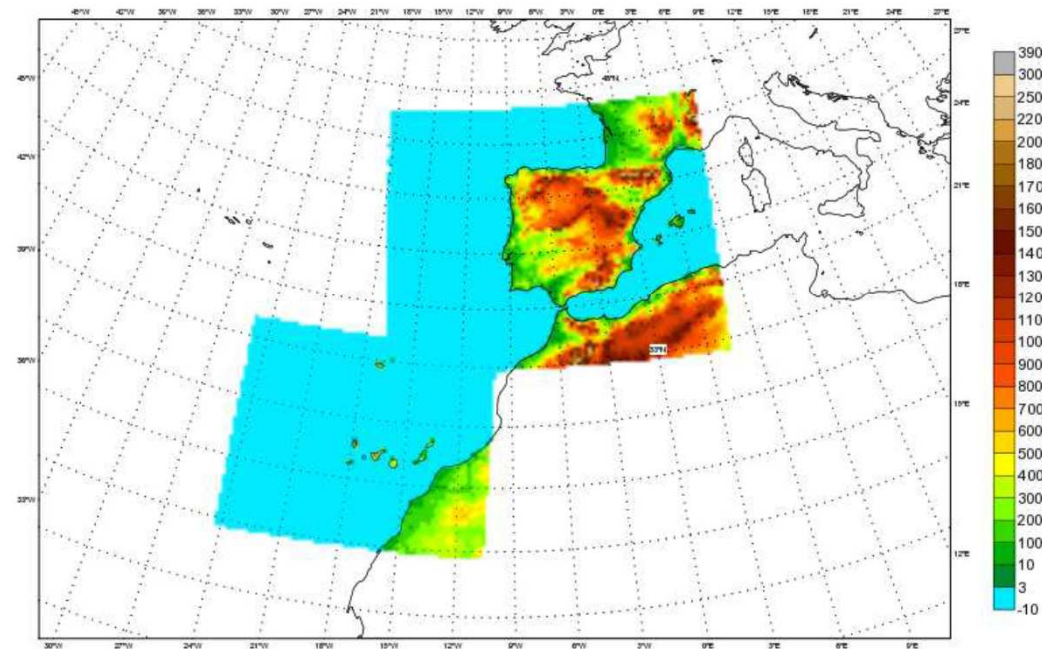


# Harmonie: Modelo de Área Limitada en AEMET

## 2 dominios integración HARMONIE/AROME 2.5 km

- Res. Horizontal de **2.5 km**, **65 niveles verticales**.
- Condiciones de contorno del ECMWF (16 → 2.5 km)
- Integraciones a las 00, 06, 12 y 18 U.T.C (→ cada 3 hr)
- Salidas horarias (→ 15 min) y alcances hasta H+48
- Parametrizaciones físicas:
  - Sin parametrización convección profunda
  - Convección somera (esquema importante): Esquemas unificados convección-turbulencia (EDMFM)
  - Turbulencia: TKE (CBR)
  - Superficie: SURFEX
  - Radiación: ECMWF → **GHI y DHI (→ DNI)**

Modelo **No Hidrostático Convection-Permitting**  
*Necesita muchos más recursos de ordenador*





## Acumulaciones horaria previstas por HARMONIE



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

AEMet  
Agencia Estatal de Meteorología

**Validación:** radiación de HARMONIE vs. observaciones para horizontes temporales de una a cuatro horas.

Presentamos los resultados utilizando **todas las estaciones** y para una, **Arenosillo**, con el objeto de poder examinar la **evolución anual** de las predicciones del modelo.

Comparación con **observaciones del 2015**.

Las predicciones se han obtenido tomando el **punto de grid más próximo** a la estación así como la **media de los cuatro puntos de grid más próximos**.

Errores relativos nRMSE aceptables utilizando modelos mesoescalares a 24 hr (\*)

**GHI** → nRMSE: **10-50%** (clear-cloudy)

**DNI** → nRMSE: **30-100%** (clear-cloudy)

\* Lara-Fanego, J.A. Ruiz-Arias, D. Pozo-Vazquez, F.J. Santos-Alamillos, and J. Tovar-Pescador, 2012: Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). Sol. Energy, 86, 2200-2217, doi:10.1016/j.solener.2011.02.014

## GHI horarias - Nearest: resultados estadísticos

GHI.Near	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
1 hora	27,76	111,71	426,81	26,17%
2 horas	26,17	105,67	390,82	27,04%
3 horas	25,96	106,83	410,91	26,00%
4 horas	24,40	110,28	422,68	26,09%

15%-30%: valores normales según satélites

10%-50%: valores normales según modelos

# GHI horarias - 4Nearest: resultados estadísticos

GHI.4N	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
1 hora	27,66	109,91	426,81	25,75%
2 horas	26,27	104,68	390,82	26,78%
3 horas	26,15	105,42	410,91	25,66%
4 horas	24,80	108,82	422,68	25,74%

**BIAS razonable** para la GHI, siempre mayor que el obtenido con los satélites y **sobreestimado** la observación.

nRMSE → buenas predicciones. **Mejores resultados con satélite las dos primeras horas y mejor con HARMONIE las dos últimas.**

15%-30%: valores normales según satélites

10%-50%: valores normales según modelos

# DNI horarias - Nearest: resultados estadísticos



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE



DNI.Near	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
1 hora	-119,62	259,50	428,79	60,52%
2 horas	-146,54	281,51	440,00	63,98%
3 horas	-180,59	305,78	489,55	62,46%
4 horas	-189,73	310,30	506,78	61,22%

25%-45%: valores normales según satélites

30%-100%: valores normales según modelos

## DNI horarias - 4Nearest : resultados estadísticos

DNI.4N	BIAS	RMSE	mean.obs	nRMSE
1 hora	-119,88	258,68	428,79	60,33%
2 horas	-146,14	280,73	440,00	63,90%
3 horas	-180,72	304,67	487,16	62,54%
4 horas	-189,47	309,62	505,03	61,31%

**BIAS muy grande** para la DNI, siempre mayor que al obtenido con los satélites y siempre **infraestimando** la observación.

nRMSE → **Peores resultados** que con satélite.

-No se ha realizado **postproceso estadístico** para **corregir el BIAS**.

-Se utilizará función de suavizado según diferentes radios para ver si se mejoran los resultado obtenidos con el satélite.

25%-45%: valores normales según satélites

30%-100%: valores normales según modelos

## GHI prevista para Murcia y Arenosillo

GHI.4N Global	BIAS	nRMSE	GHI.4N Murcia	BIAS	nRMSE	GHI.4N Arenosillo	BIAS	nRMSE
1 hora	27,66	26%	1 hora	19,32	20%	1 hora	18,10	21%
2 horas	26,27	27%	2 horas	22,74	25%	2 horas	18,53	21%
3 horas	26,15	26%	3 horas	21,52	25%	3 horas	18,65	20%
4 horas	24,80	26%	4 horas	19,11	24%	4 horas	20,33	22%

A grandes rasgos tanto **Murcia** como **Arenosillo** presentan menores errores en cuanto al BIAS y nRMSE. Siempre **sobreestimando** ligeramente.

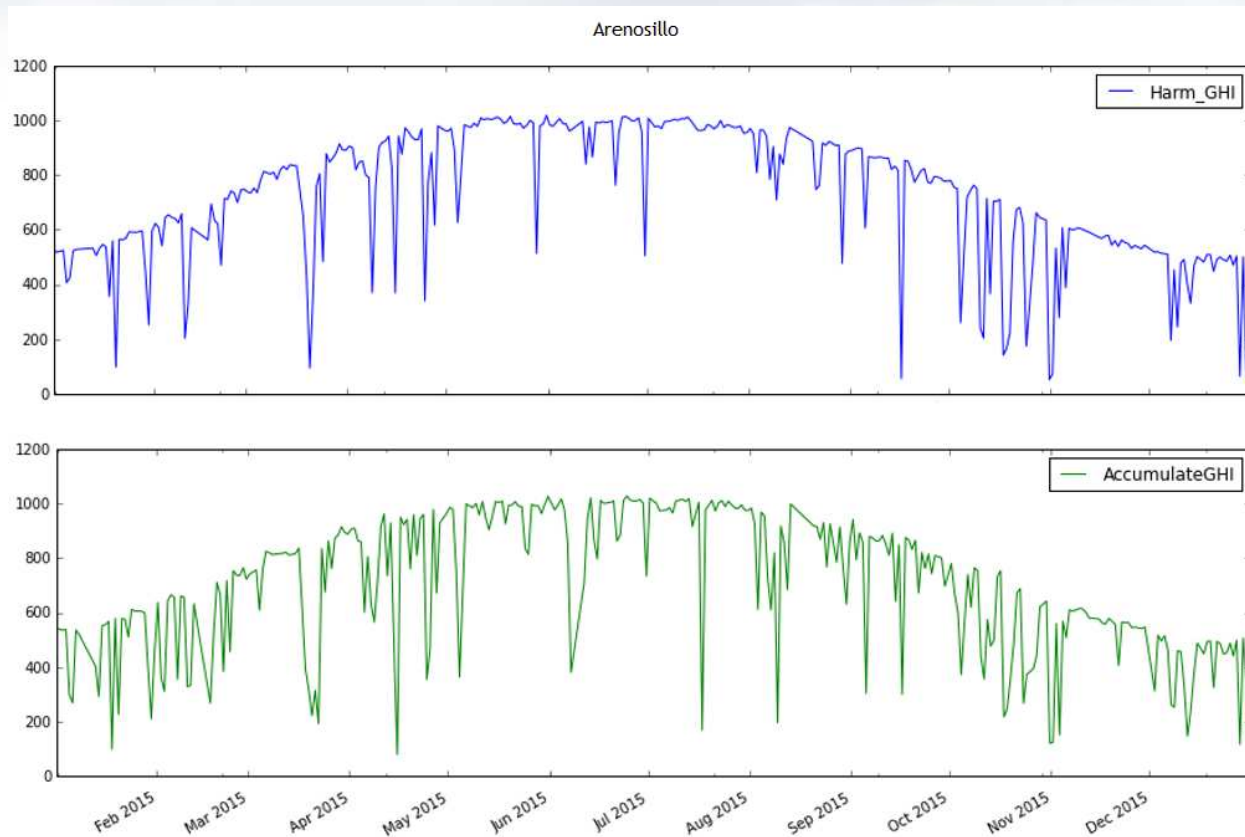
## GHI prevista para Murcia y Arenosillo

DNI.4N Global	BIAS	nRMSE	DN.4N Murcia	BIAS	nRMSE	DN.4N Arenosillo	BIAS	nRMSE
1 hora	-119,88	60%	1 hora	-131,31	56%	1 hora	-119,24	58%
2 horas	-146,14	64%	2 horas	-163,97	62%	2 horas	-156,91	59%
3 horas	-180,72	63%	3 horas	-190,62	60%	3 horas	-210,11	58%
4 horas	-189,47	61%	4 horas	-194,43	60%	4 horas	-220,71	58%

Para ambas estaciones **menores nRME** que los obtenidos utilizando todas las estaciones pero siempre **mayores a los obtenidos para la GHI**. BIAS mayor que el promedio y siempre **infraestimando**.

→ **Diferentes comportamientos según la estación** de estudio, esto vuelve a dejar abierta la posibilidad de realizar calibraciones por estación en un futuro.

# GHI horarias según HARMONIE: evolución anual (2015)



Arenosillo:

HARMONIE (+01 hr) vs. observaciones GHI horarias a las 13:00 UTC (2015)

Bien representada la oscilación anual observada y aceptablemente se reproduce la señal.

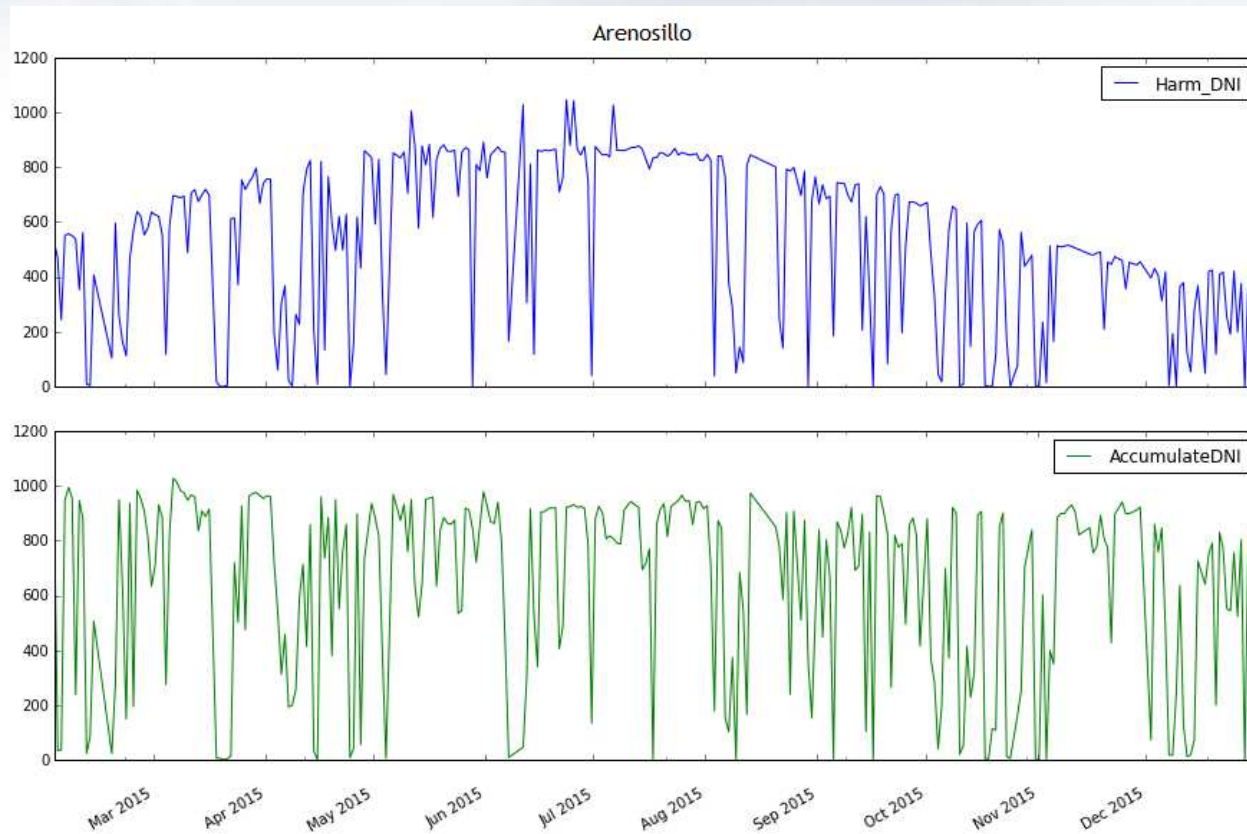


## DNI horarias según HARMONIE: evolución anual (2015)



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE



Arenosillo:

HARMONIE vs. observaciones

DNI horarias a las 13:00 UTC (2015)

Con la DNI, al igual que ocurrió con los datos de satélite, la oscilación anual se identifica bien en el modelo y no así en las observaciones.



## Conclusiones y trabajo Futuro

### SATELITE:

Predicción de la **GHI** horaria: **buenos resultados para todos los alcances.**

Predicción de la **DNI** horaria: **mejores resultados hasta las dos primeras horas.**

### HARMONIE:

la **GHI** se predice mejor utilizando los datos de satélite durante las dos primeras horas y **mejor utilizando los datos del modelo las dos últimas horas.**

La predicción de la **DNI** proporciona **peores resultados** quedando pendiente nuevos cálculos.

Se procederá a continuación al **diseño de la herramienta de predicción** determinándose la **función de distribución** de los dos tipos de predicción para las diferentes horas.

Cuando se tenga diseñada la herramienta se procederá según lo comprometido a su **aplicación en emplazamientos de plantas solares seleccionados.**

**Igualmente se validará con las observaciones de los radiómetros de AEMET** y con las predicciones del modelo del modelo de predicción de la radiación desarrollado por el Área de Aplicaciones.

Finalmente se procederá a la **documentación e implementación de la herramienta para su uso operativo.**

# Referencias

Cano, D., Monget, J. M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., and Wald, L.: A method for the determination of the global solar-radiation from meteorological satellite data, *Solar Energy*, 37, 31-39, 1986.

EUMETSAT (2008), User Manual for the SAFNWC/MSG Parallax Correction Tool, Ref GMV/SAFCDOP/VSAREP/02 Internal code: GMVSA 20647/08 Version: 1.0, Date: 02/06/08. Disponible en: [https://www.nwcsaf.org/HD/files/vsadoc/GMV-SAFCDOP-VSAREP-02\\_v1.0.pdf](https://www.nwcsaf.org/HD/files/vsadoc/GMV-SAFCDOP-VSAREP-02_v1.0.pdf)

EUMETSAT (2013), Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (CMA-PGE01 v3.2, CT-PGE02 v2.2 & CTT-PGE03 v2.2), Ref SAF/NWC/CDOP2/MFL/SCI/ATBD/01, Issue 3, Rev. 2.1, Date 15 July 2013. Disponible en: [https://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP2-MFL-SCI-ATBD-01\\_v3.2.1.pdf](https://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP2-MFL-SCI-ATBD-01_v3.2.1.pdf)

EUMETSAT (2013), Algorithm Theoretical Basis Document for the "Extrapolated Imagery" product (EXIM-PGE16 v1.0) NWC/CDOP2/GEO/ZAMG/SCI/ATBD/Wind, Issue 1.0, Date 29 November 2013. (Documento SAF interno)

EUMETSAT (2014), Algorithm Theoretical Basis Document for “High Resolution Winds” (HRW - PGE09 v4.0) SAF/NWC/CDOP2/INM/SCI/ATBD/09, Issue 4, Rev.0.1, Date 4 December 2014. Disponible en: [https://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-ATBD-09\\_v4.0.1.pdf](https://www.nwcsaf.org/scidocs/Documentation/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-ATBD-09_v4.0.1.pdf)

Lara-Fanego, J.A. Ruiz-Arias, D. Pozo-Vazquez, F.J. Santos-Alamillos, and J. Tovar-Pescador, 2012: Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Sol. Energy*, 86, 2200-2217, doi:10.1016/j.solener.2011.02.014

Perez, R., T. Cebeauer, M. Suri, (2013): Semi-Empirical Satellite Models, in: *Solar Resource Assessment and Forecasting* (Editor Jan Kleissl), Elsevier, 2013.

Reno, M. J., and Stein, J. S., "Using Cloud Classification to Model Solar Variability". ASES National Solar Conference, Baltimore, MD, 2103.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

**Aemet**  
Agencia Estatal de Meteorología

**¡Muchas gracias!**