



El uso de las observaciones de satélite en la meteorología

Carlos Ordóñez (carlordo@ucm.es)
Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica
Facultad de Ciencias Físicas

II Curso Complutense de Introducción a la
Exploración del Espacio y su Utilización.
Noviembre de 2024.

CONTENIDOS

1. Las observaciones meteorológicas.
2. Fundamentos de radiación. Canales de los satélites meteorológicos.
3. Uso de observaciones satelitales en la predicción operativa meteorológica.
4. Otros productos derivados de satélites de observación de la Tierra.

1. Las observaciones meteorológicas

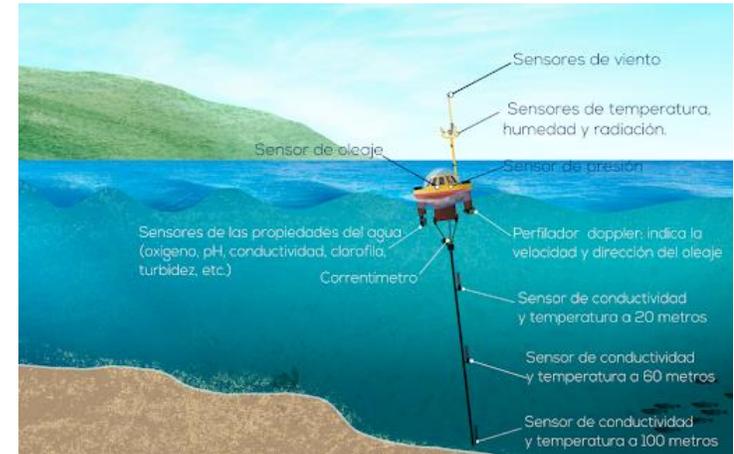
Observaciones en superficie

Estaciones meteorológicas automatizadas o manejadas por observadores que miden todo tipo de variables meteorológicas. Es la forma más sencilla y barata de tomar medidas.



Observaciones marinas

En los océanos y mares las observaciones provienen de barcos, boyas fijas y boyas a la deriva.

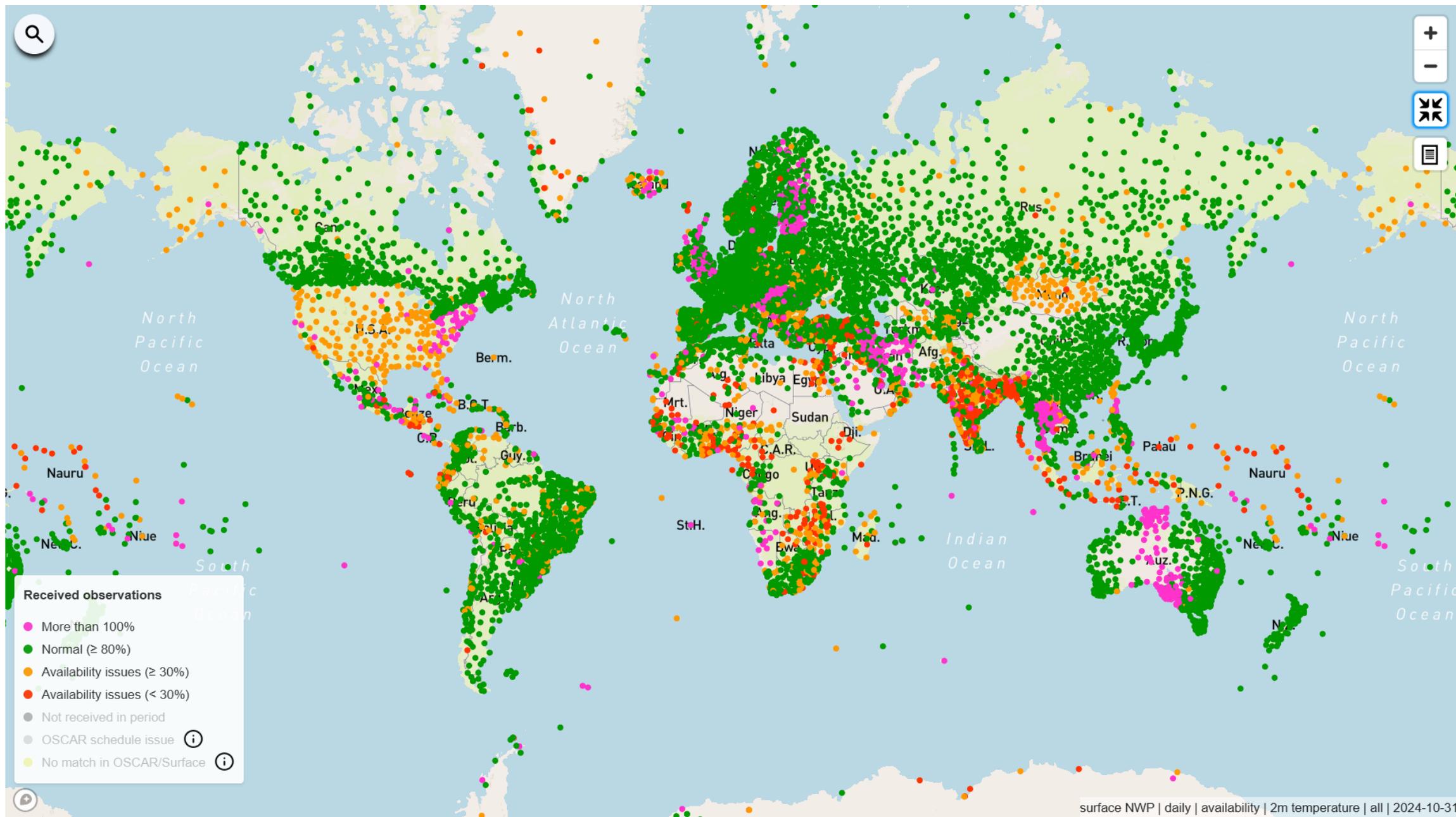


Radiosondeos

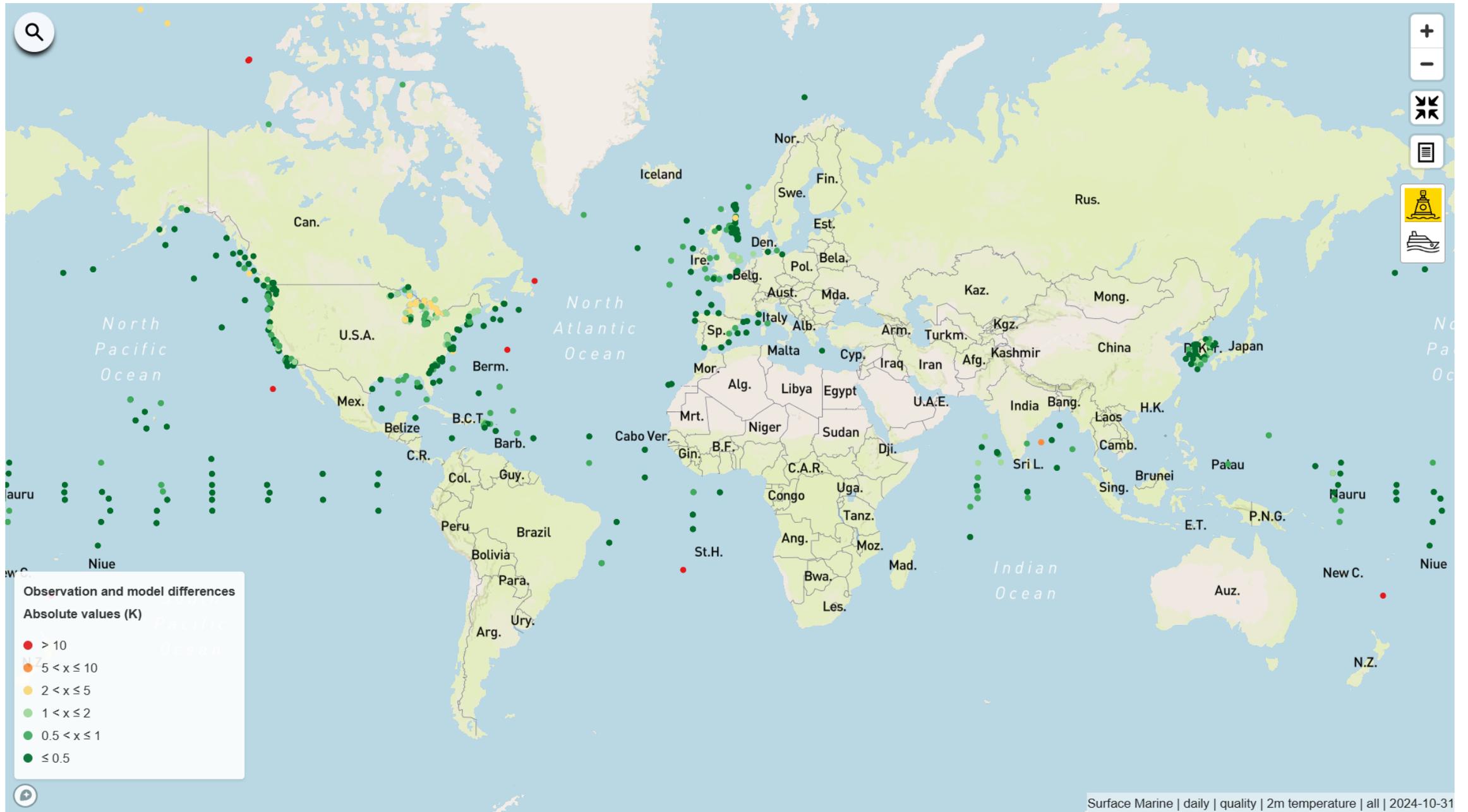
Globos meteorológicos con una radiosonda que se lanzan para para medir varios parámetros atmosféricos y transmitirlos a un aparato receptor fijo.



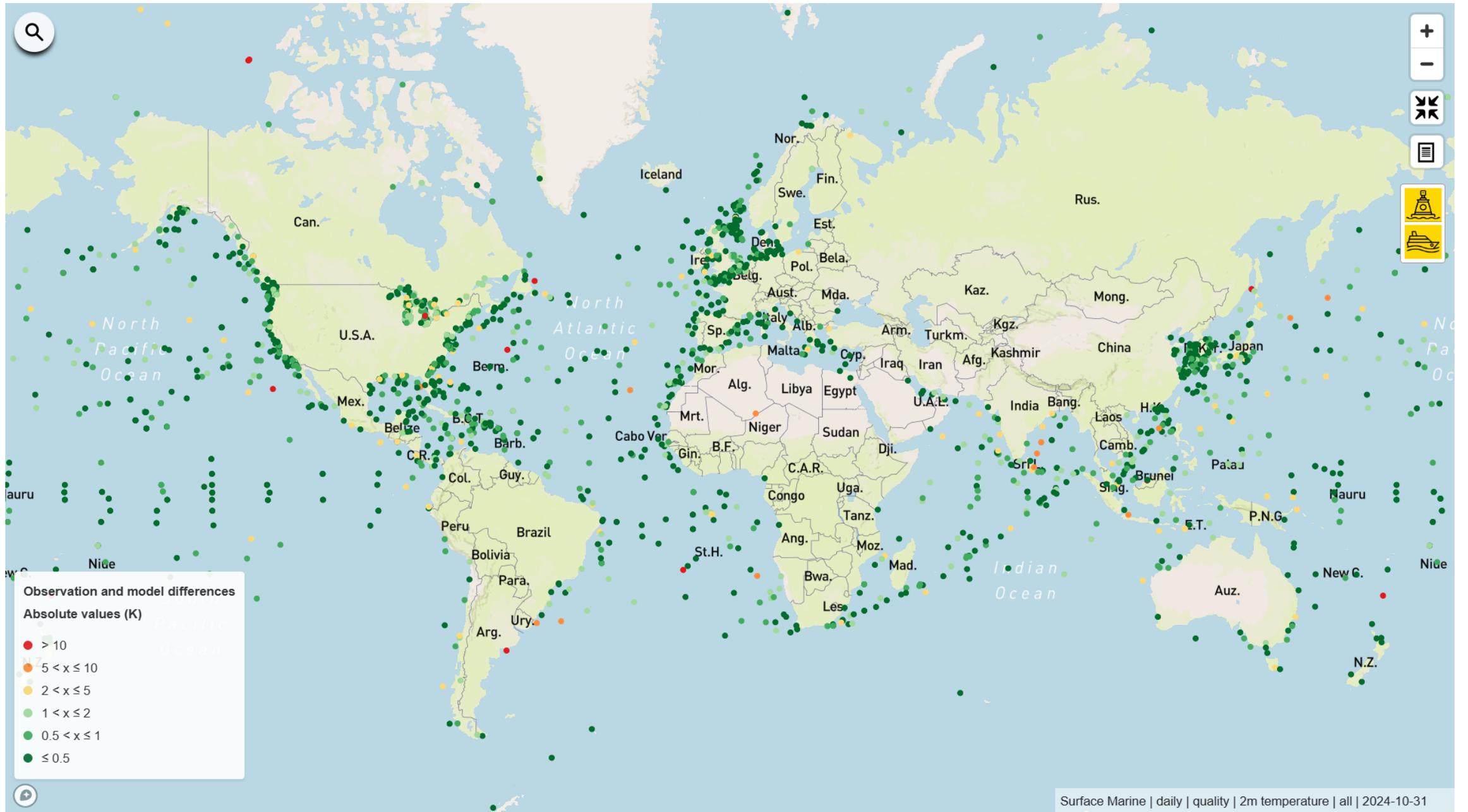
Disponibilidad de observaciones de temperatura desde la superficie (31/10/2024)



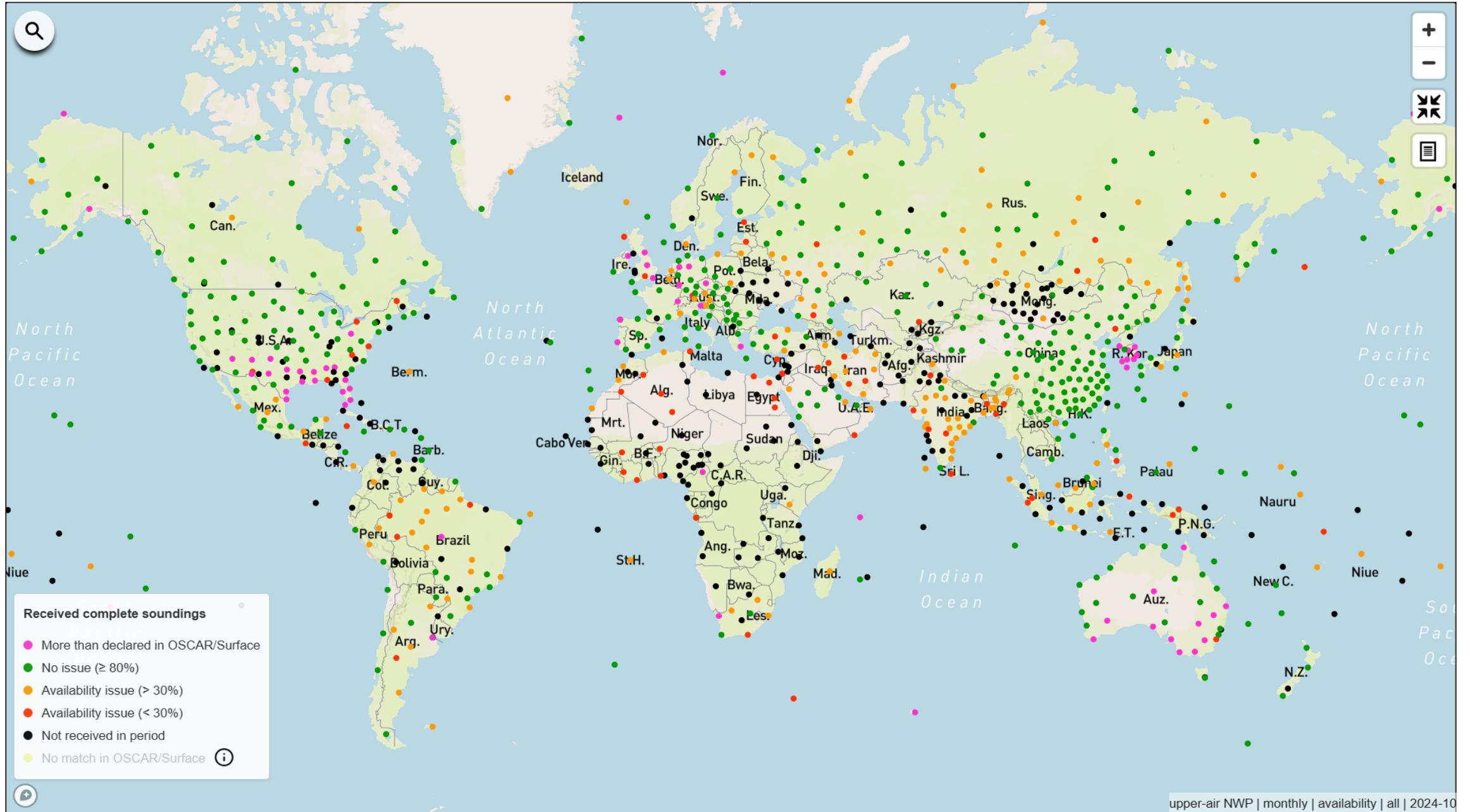
Observaciones de temperatura desde la superficie del océano (31/10/2024)



Observaciones de temperatura desde la superficie del océano (31/10/2024)



Disponibilidad de observaciones realizadas con radiosondeos (octubre 2024)



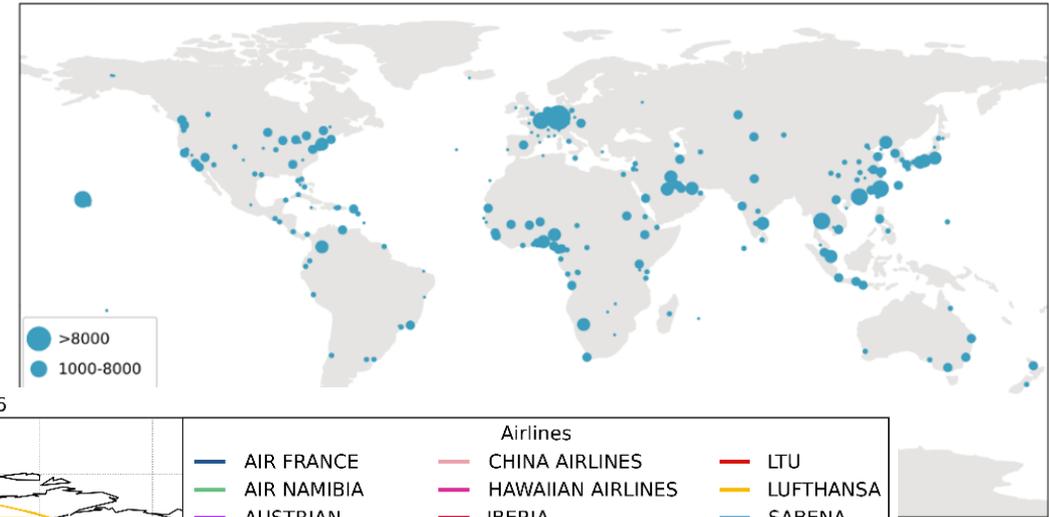
Observaciones desde aviones comerciales (1994-2020)



Las observaciones aeronáuticas son fundamentales para obtener datos en altura, especialmente en zonas donde es complicado hacer radiosondeos (ej. océanos).

<http://www.iagos-data.fr/portal.html>

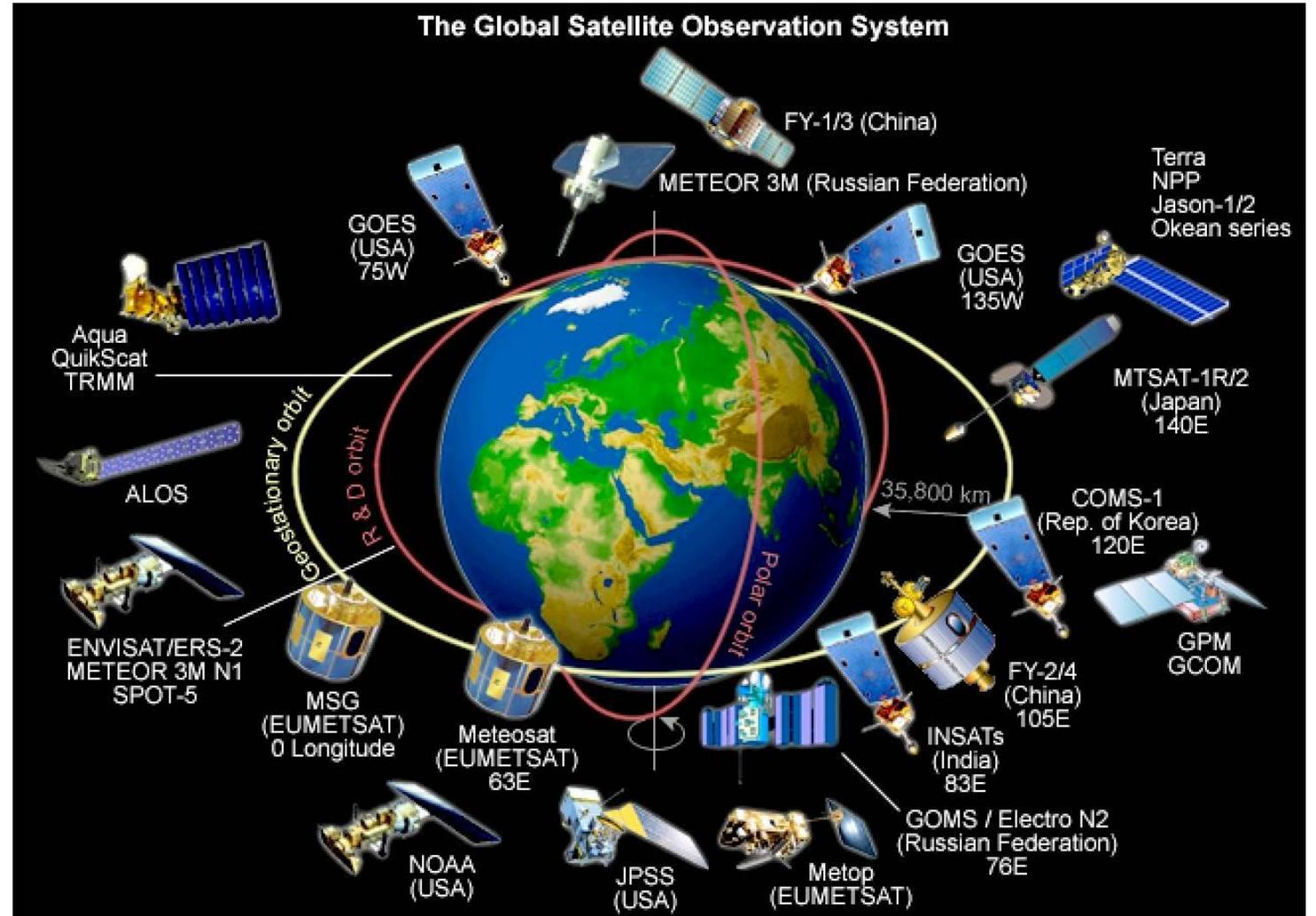
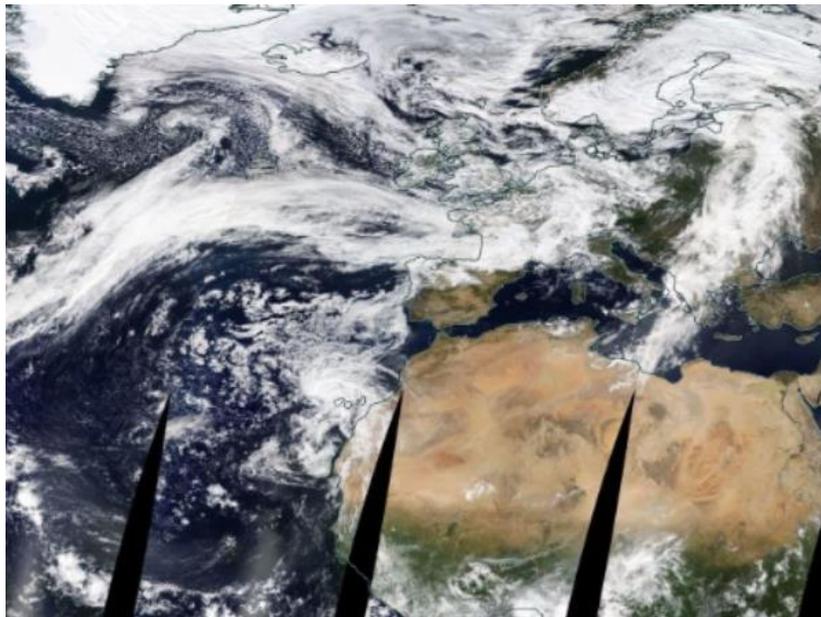
IAGOS Airports since 20110708



62163 Flights from 19940801 to 20200926

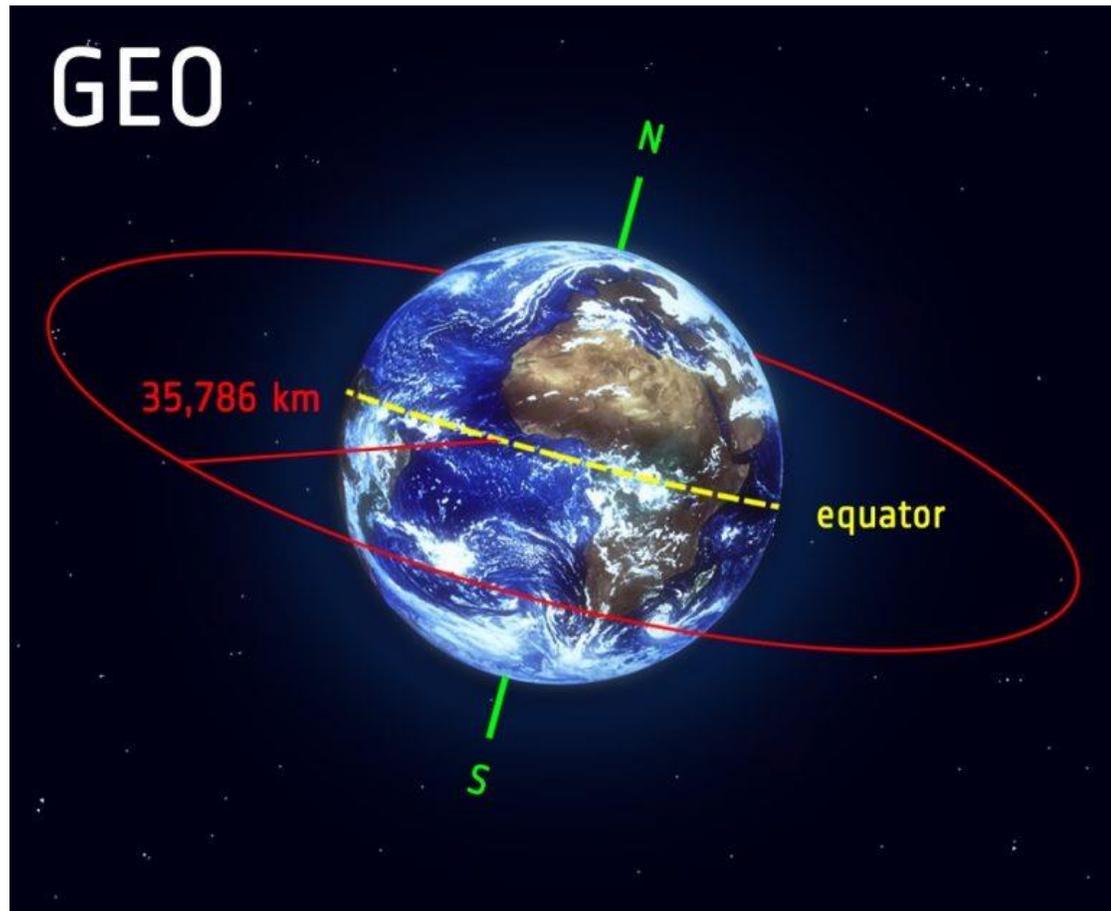


Observaciones desde satélites meteorológicos

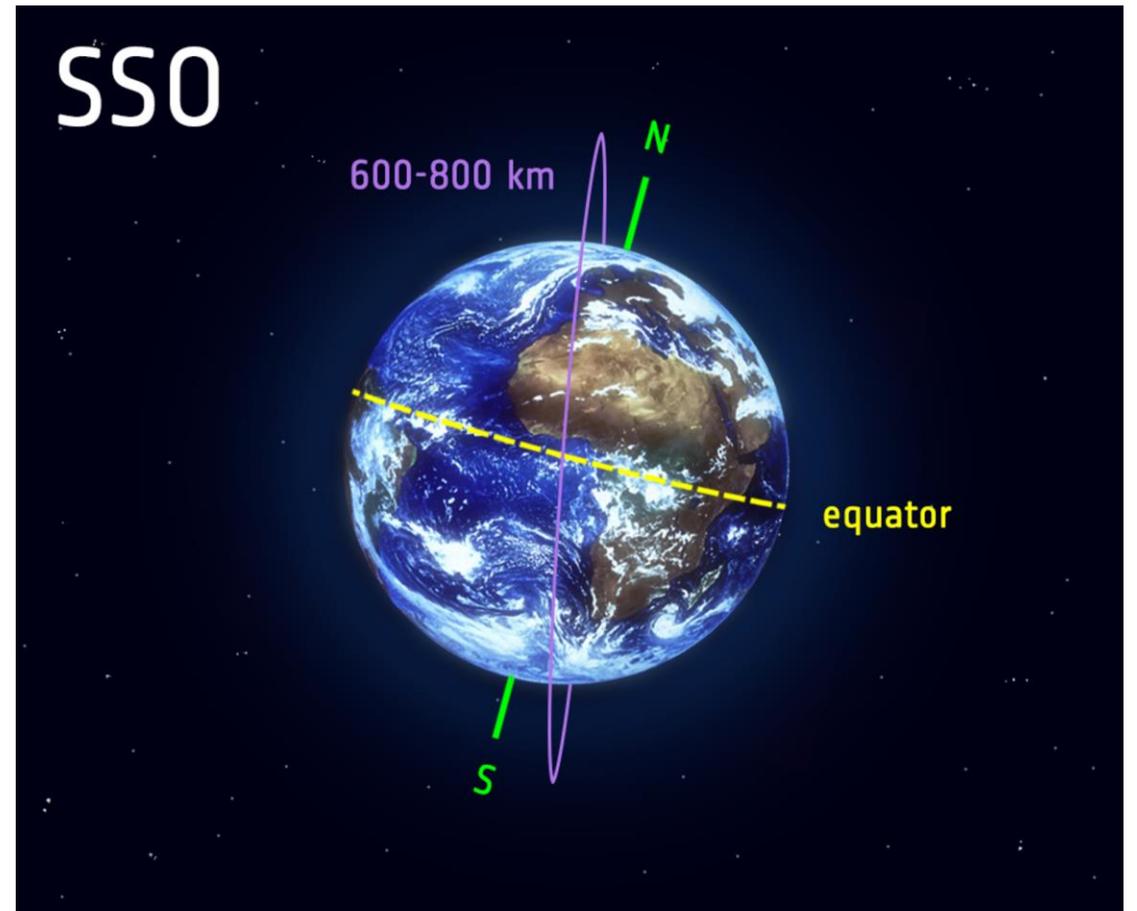


Satélites meteorológicos en órbita alrededor de la Tierra

Observaciones desde satélites meteorológicos

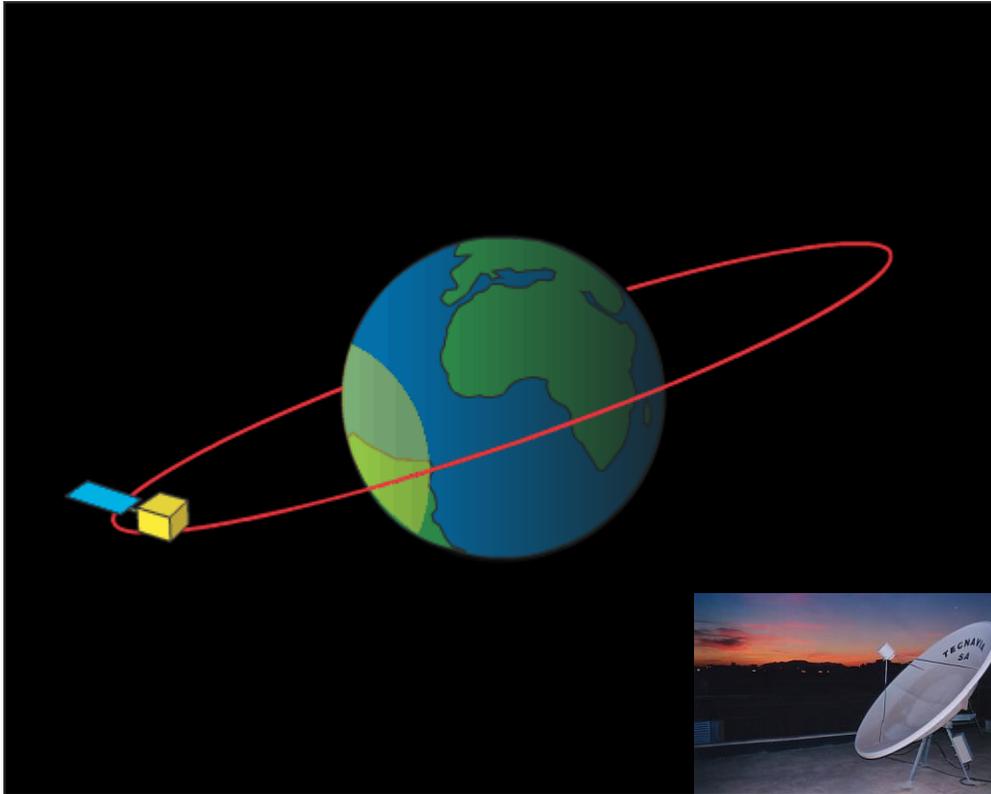


Geoestacionarios. Situados sobre un punto fijo de la superficie terrestre. Útiles para el seguimiento continuado del tiempo en una región determinada.

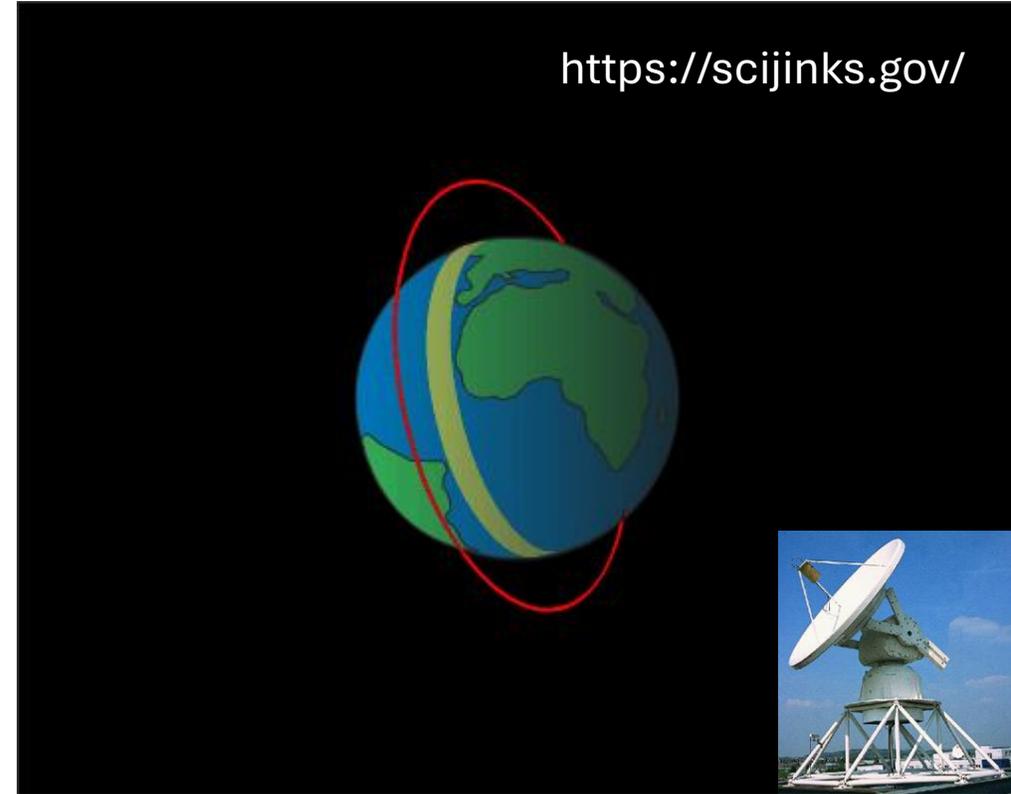


Polares. Barren toda la superficie de la Tierra. Mejor resolución espacial que los geoestacionarios.

Observaciones desde satélites meteorológicos



Geoestacionarios. Situados sobre un punto fijo de la superficie terrestre. Útiles para el seguimiento continuado del tiempo en una región determinada.



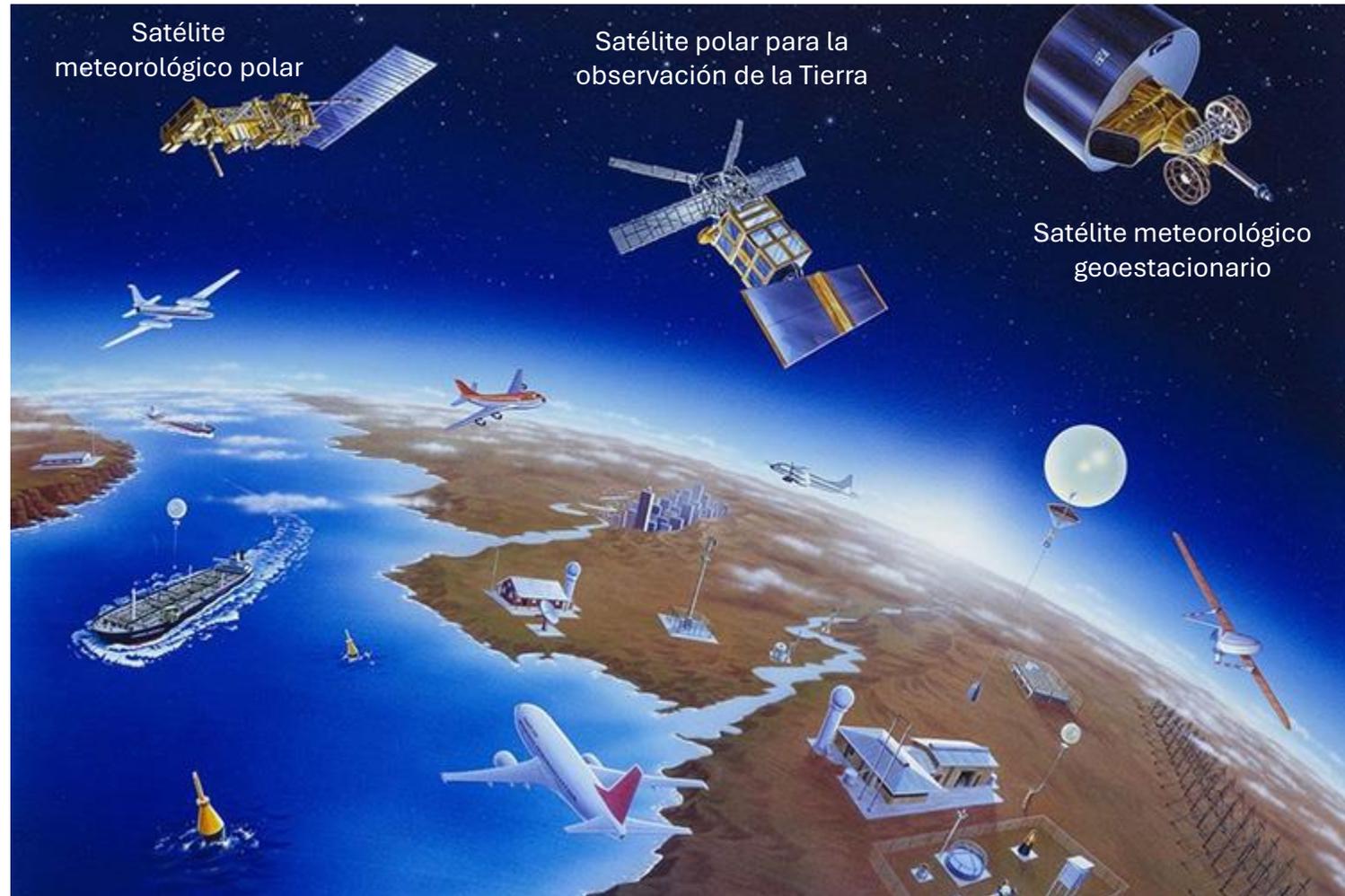
Polares. Barren toda la superficie de la Tierra. Mejor resolución espacial que los geoestacionarios.

Observaciones de satélite comparadas con las observaciones desde la superficie de la Tierra

Ventajas	Desventajas
<p>Cobertura global, incluyendo zonas remotas y océanos.</p> <p>Medida simultánea de varios parámetros.</p>	<p>No realizan observaciones directas.</p>
<p>Buena relación costo / beneficio para proporcionar una gran cantidad de datos.</p>	<p>Se necesita un presupuesto elevado para poner un satélite en órbita, además de para mantener los sistemas de recepción y comunicaciones.</p>
<p>Pueden tomar medidas a través de toda la atmósfera en condiciones favorables.</p>	<p>Observaciones de parámetros en superficie y en la baja atmósfera se ve dificultada por la presencia de nubes.</p>

Las observaciones desde satélite son complementarias a las de otras plataformas.

Red de observaciones meteorológicas



El **Sistema de Observación Global** combina observaciones realizadas desde la superficie y desde plataformas aeroespaciales. De esta forma se consigue una representación tridimensional de las condiciones atmosféricas.

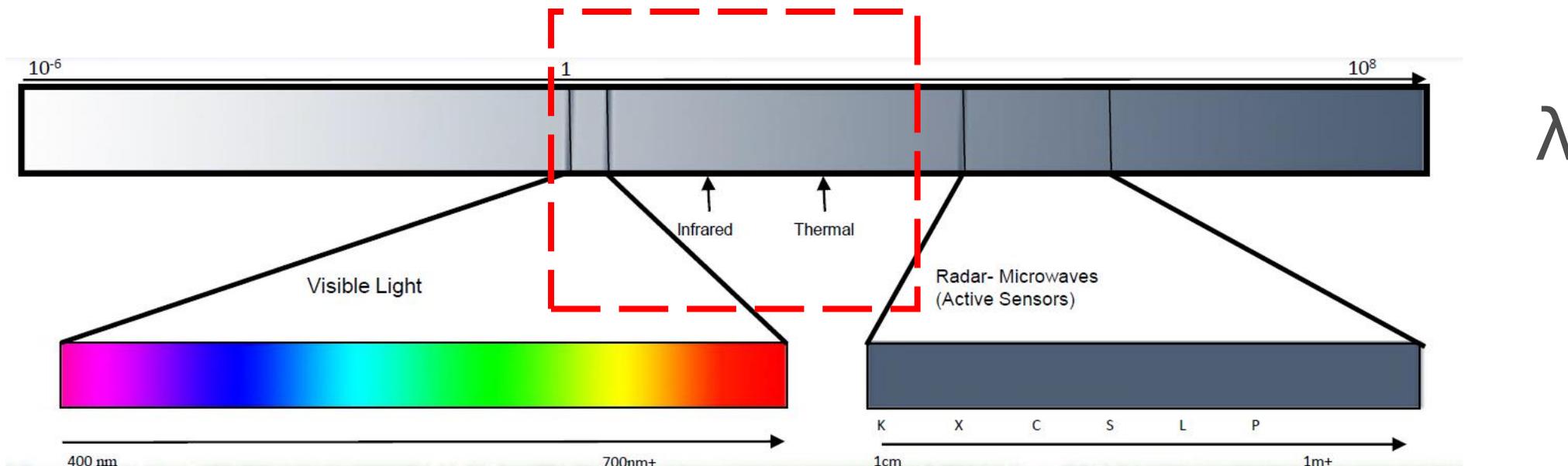
2. Fundamentos de radiación.

Canales de los satélites meteorológicos

Sistemas de teledetección

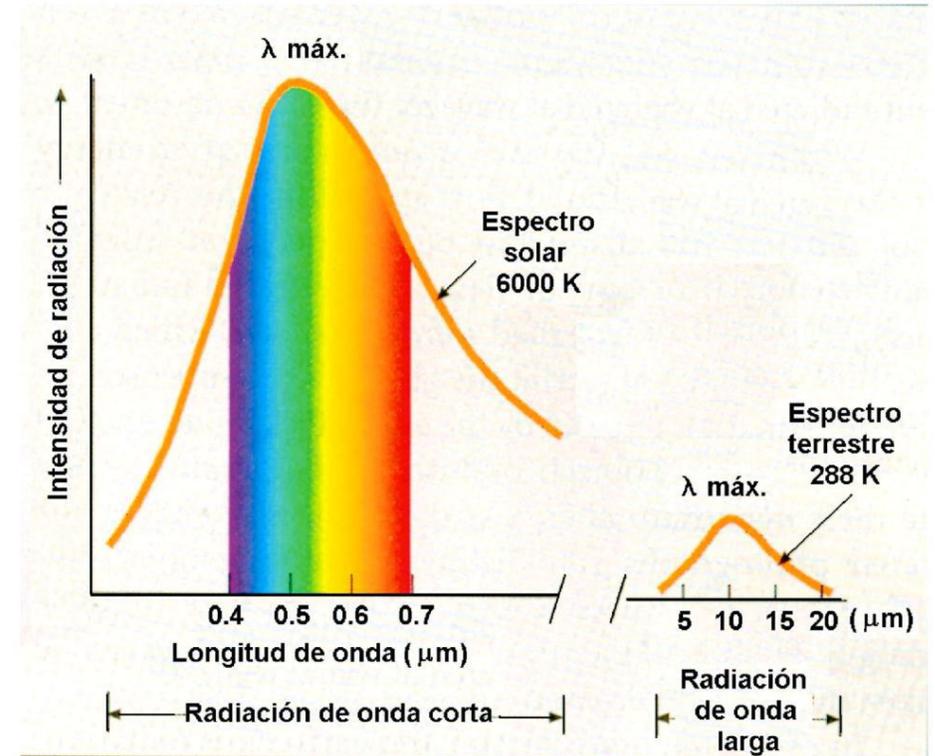
Los sistemas de teledetección utilizan el espectro electromagnético de dos maneras:

1. Recogiendo la radiación reflejada, emitida o dispersada por un objetivo (**sistemas pasivos**) → **sensores de los satélites meteorológicos**
2. Iluminando un objetivo con un pulso o haz de radiación y recogiendo la señal que es reflejada o refractada hacia el sensor (**sistemas activos**).



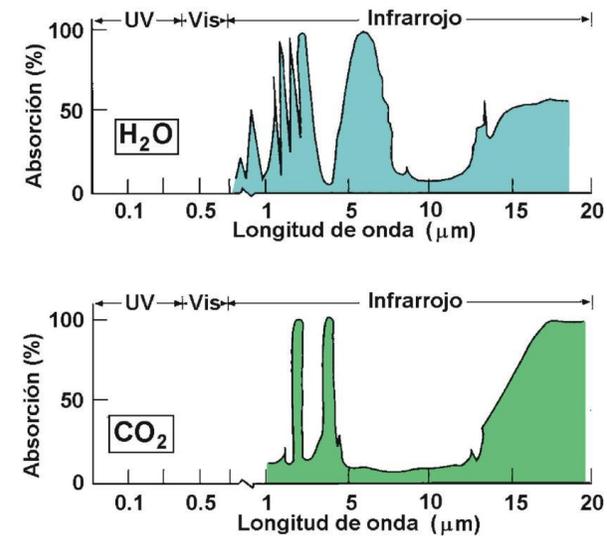
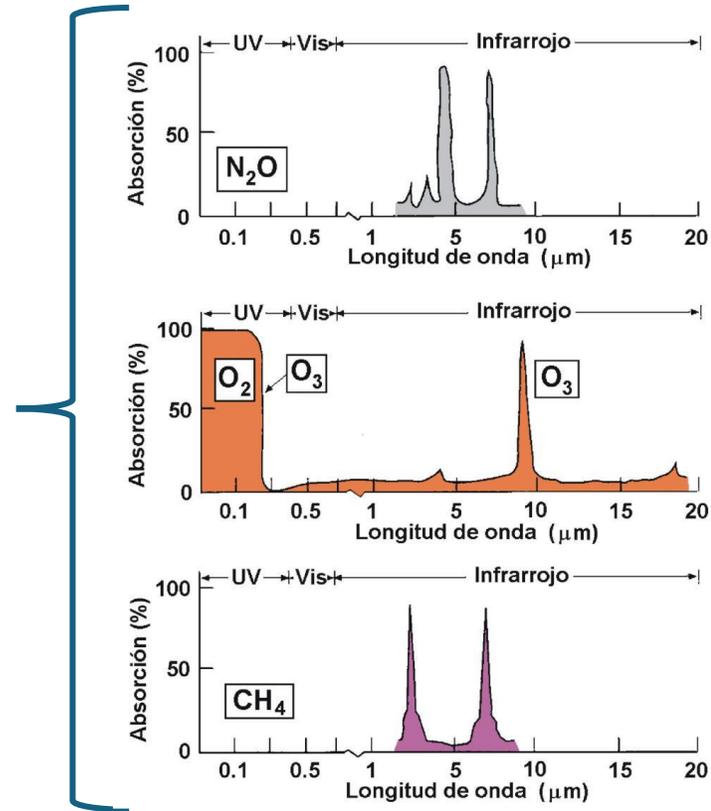
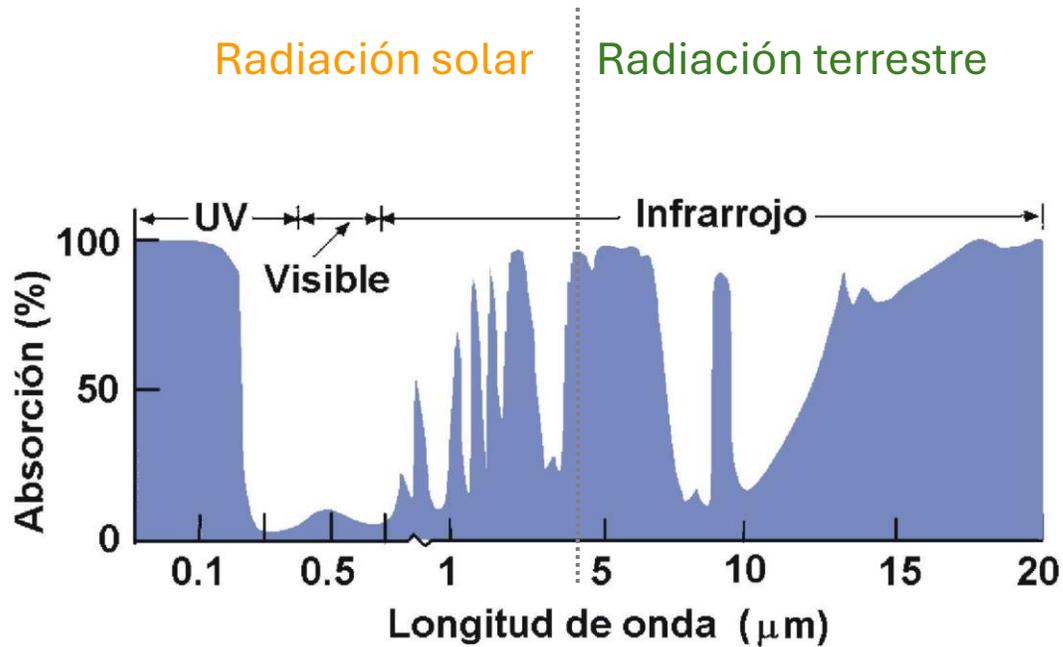
Distribución espectral de energía emitida por el Sol y la Tierra

Onda	Longitud (nm)	Sol	Tierra
Ultravioleta	$\lambda < 380$	7%	-
Visible	$380 < \lambda < 720$	44%	-
Infrarrojo cercano	$720 < \lambda < 1500$	37%	0.07%
Infrarrojo lejano	$\lambda > 1500$	12%	99.9%



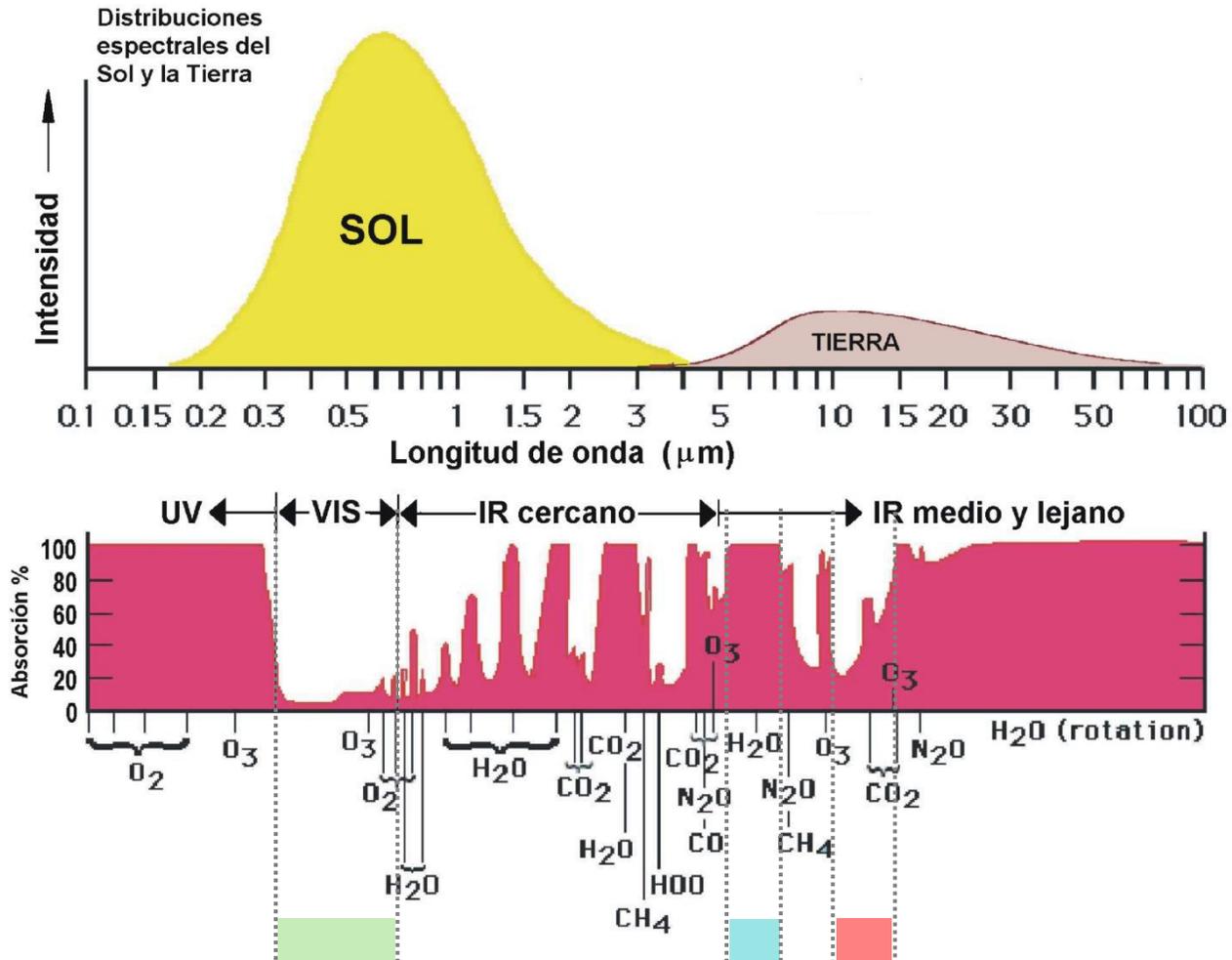
- Radiación **solar**: muy energética, longitud de **onda corta**.
- Radiación **terrestre**: poco energética, de longitud de **onda larga**.

Absorción de radiación por gases atmosféricos



- La atmósfera absorbe poco entre 0.4 y 1.5 μm y mucho entre 4 y 50 μm .
- Ventana atmosférica entre 7-9 μm y 10-12 μm donde se absorbe poco.

Distribución espectral de energía emitida por el Sol y la Tierra



Canales de los satélites meteorológicos

0.4 – 0.9 μm	VISIBLE	
10.5 – 12.5 μm	IR TÉRMICO	
5.7 – 7.1 μm	VAPOR DE AGUA	

Canales disponibles en Meteosat Second Generation (MSG)

Canal		Centro de longitud de onda (μm)	Longitud de onda (μm)	Usos primarios	Resolución en el punto subsatélite
1	VIS	0.6	0.56 - 0.71	Visible, superficie, nubes	3 km
2	VIS	0.8	0.74 - 0.88	Visible, superficie, nubes	3 km
3	NIR	1.6	1.50 - 1.78	Infrarrojo cercano, superficie, tipos de nubes	3 km
4	IR	3.9	3.48 - 4.36	Infrarrojo de onda corta, superficie, tipos de nubes	3 km
5	WV	6.2	5.35 - 7.15	Vapor de agua, nubes altas	3 km
6	WV	7.3	6.85 - 7.85	Vapor de agua	3 km
7	IR	8.7	8.30 - 9.1	Superficie, nubes	3 km
8	IR	9.7	9.38 - 9.94	Ozono	3 km
9	IR	10.8	9.80 - 11.80	Infrarrojo de onda larga, superficie, nubes	3 km
10	IR	12.0	11.00 - 13.00	Superficie, nubes	3 km
11	IR	13.4	12.40 - 14.40	Altura de Cirros	3 km
12	HRV	0.7	0.4 - 1.1	Banda ancha visible de alta resolución	1 km

El uso combinado de distintas bandas de observación se utiliza para evaluar propiedades de la superficie o de las nubes.



Imagen en el canal visible
(reflexión de radiación solar)

Meteosat Second Generation

MSG VIS 0.8 μm

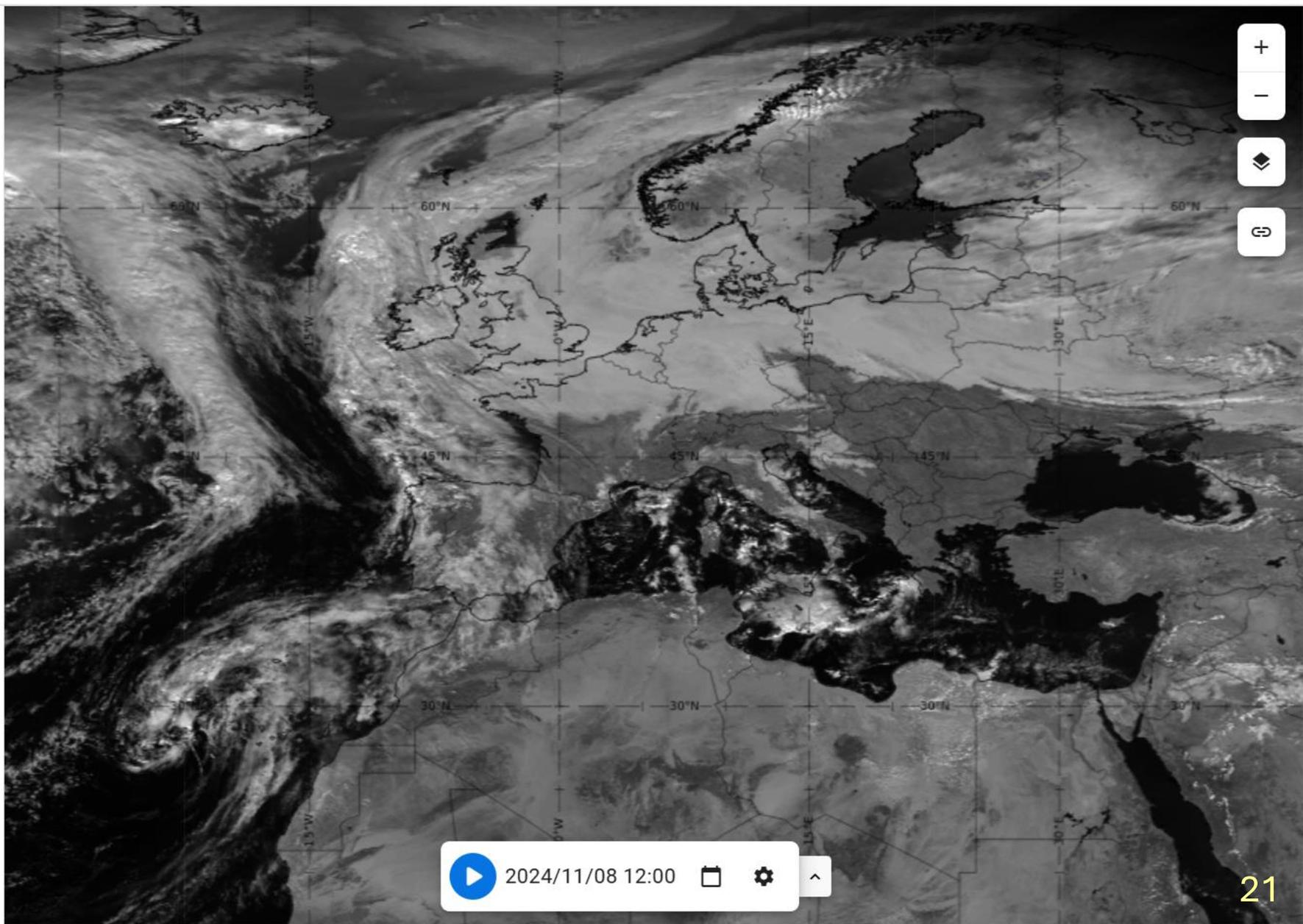
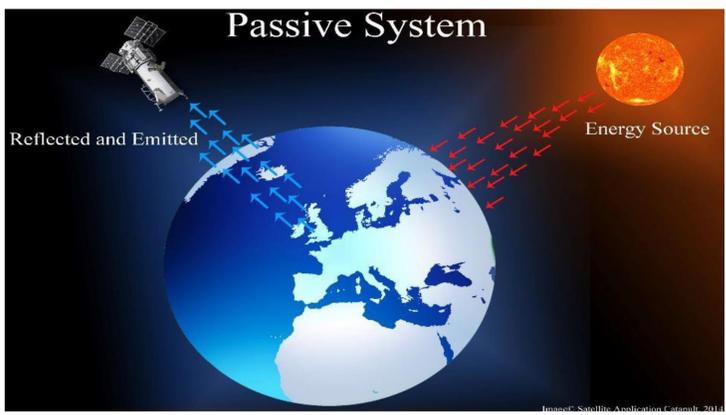


Imagen en el canal infrarrojo
(emisión desde la Tierra y su atmósfera)

Meteosat Second Generation

MSG IR 10.8 μm

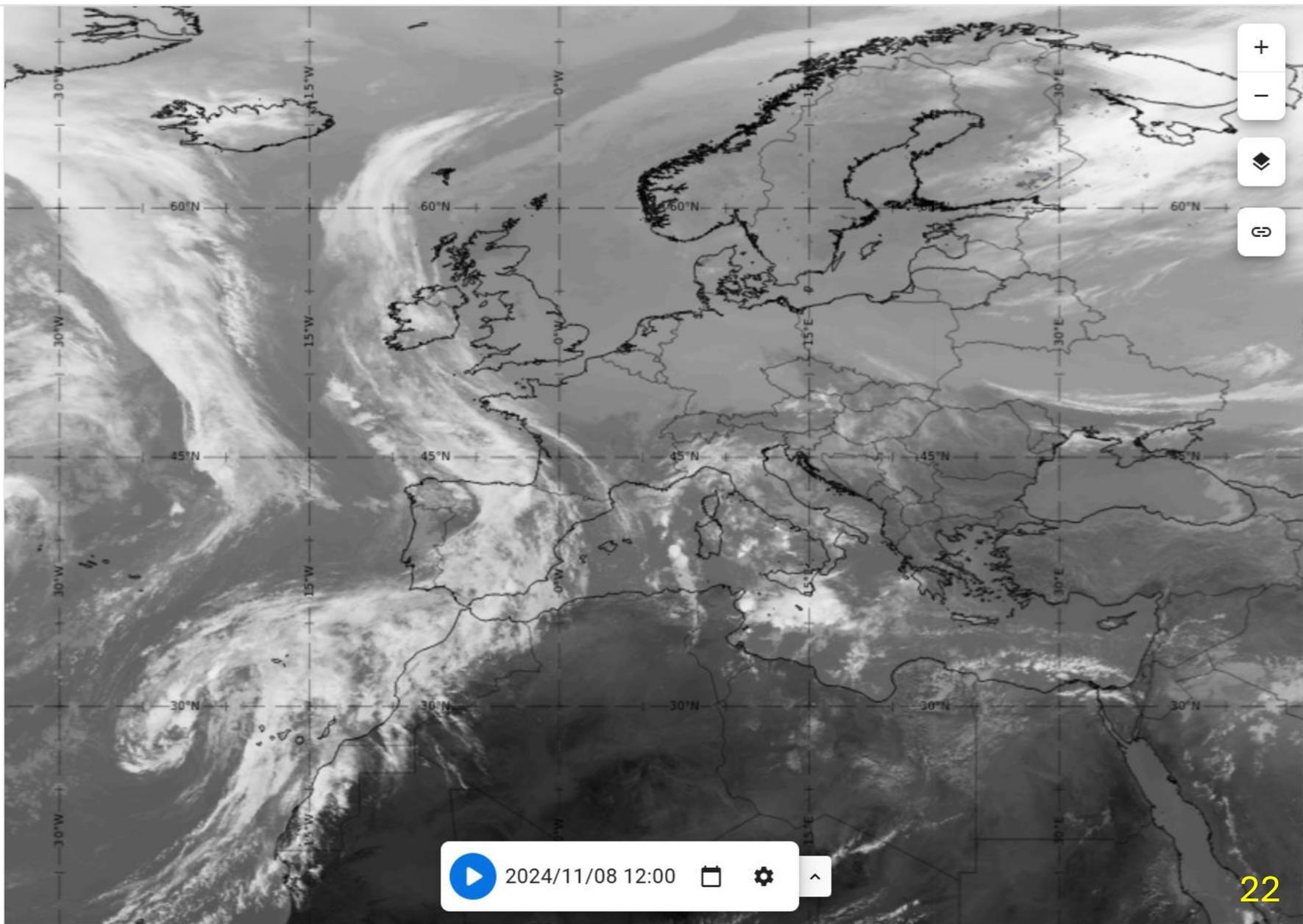
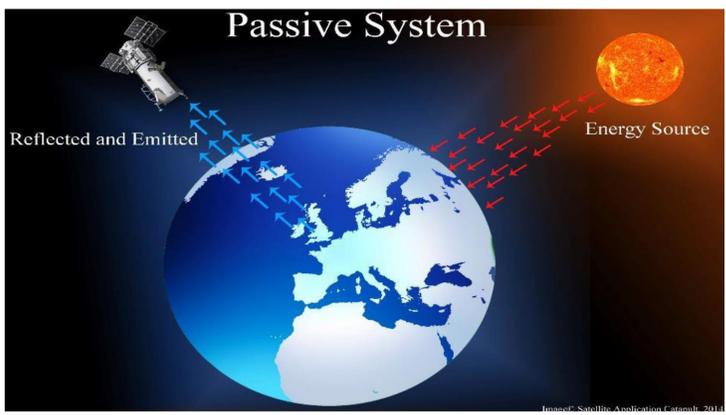


Imagen en el canal infrarrojo
(emisión desde la Tierra y su
atmósfera)
+
Nubes con precipitación

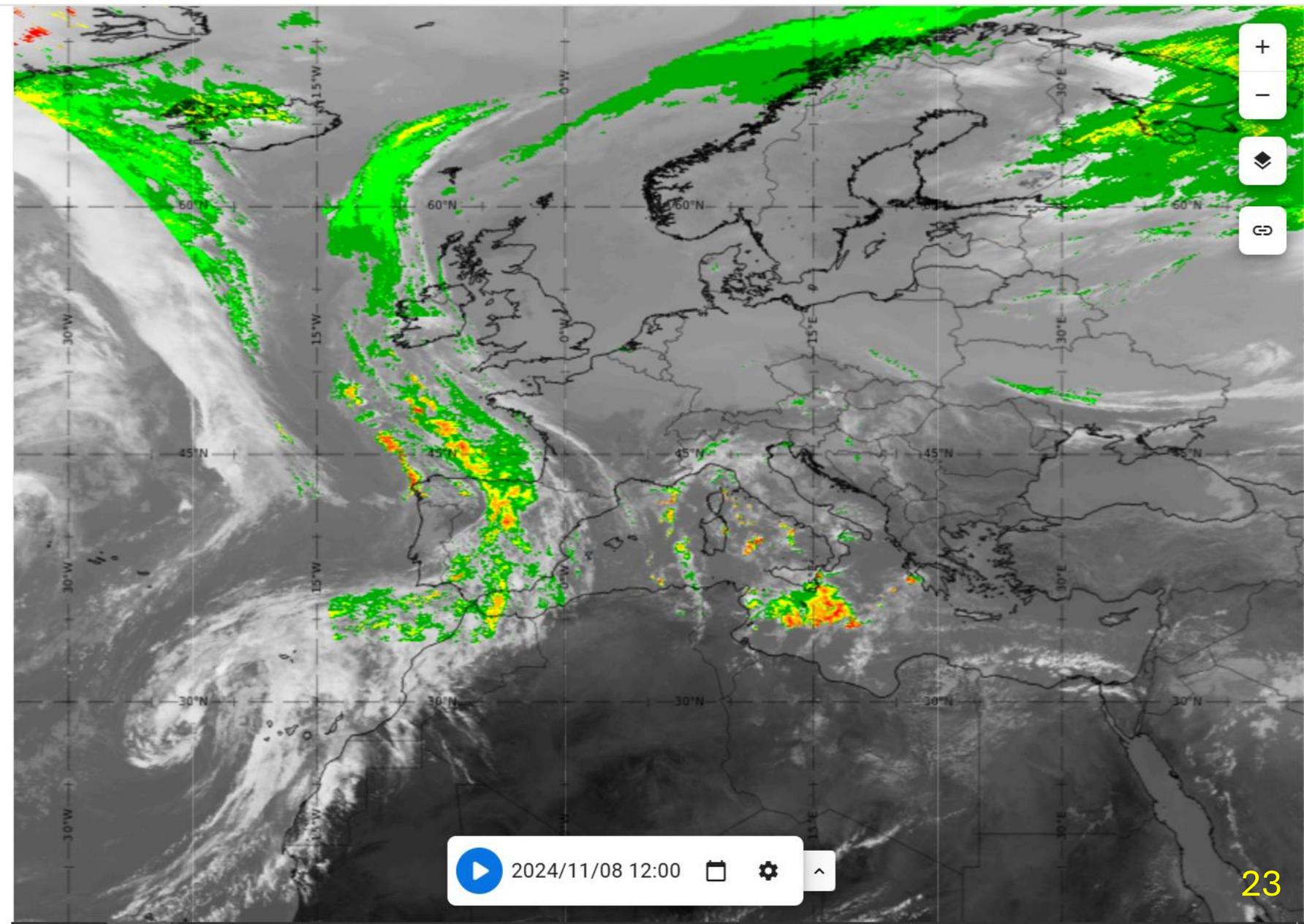
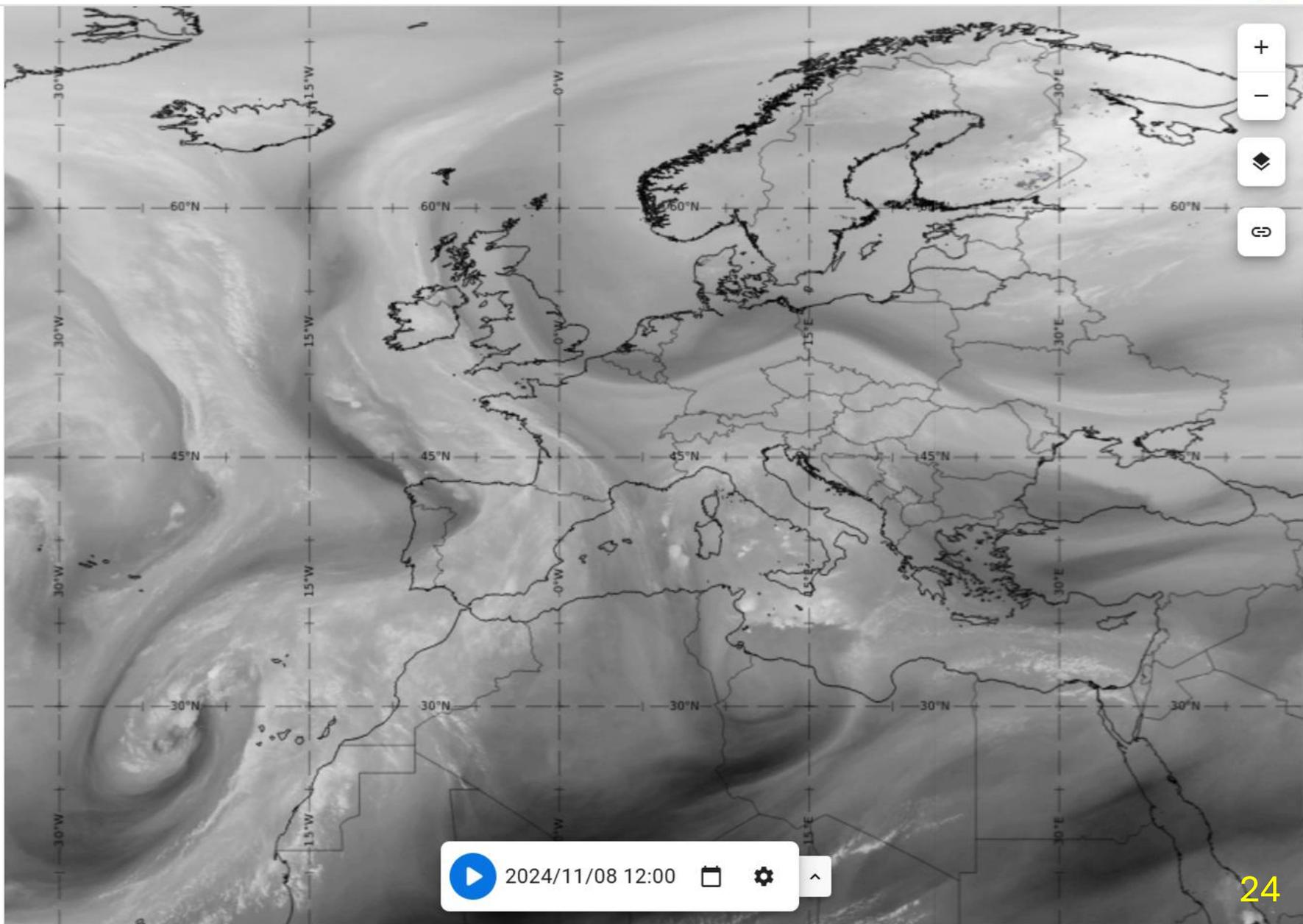
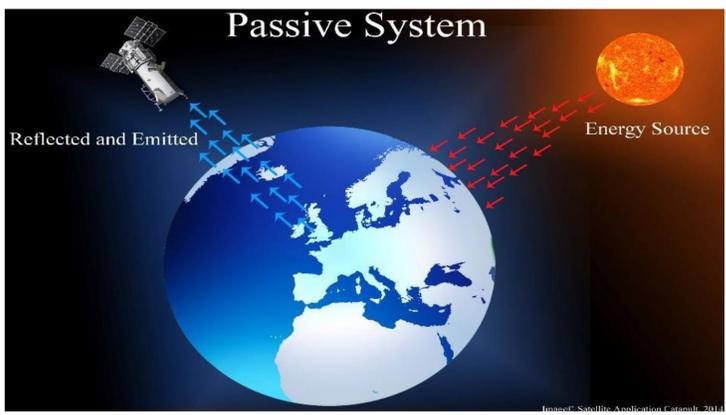


Imagen en el canal de vapor de agua
(absorción de radiación terrestre
debida al vapor de agua)

Meteosat Second Generation

MSG WV 6.2 μm

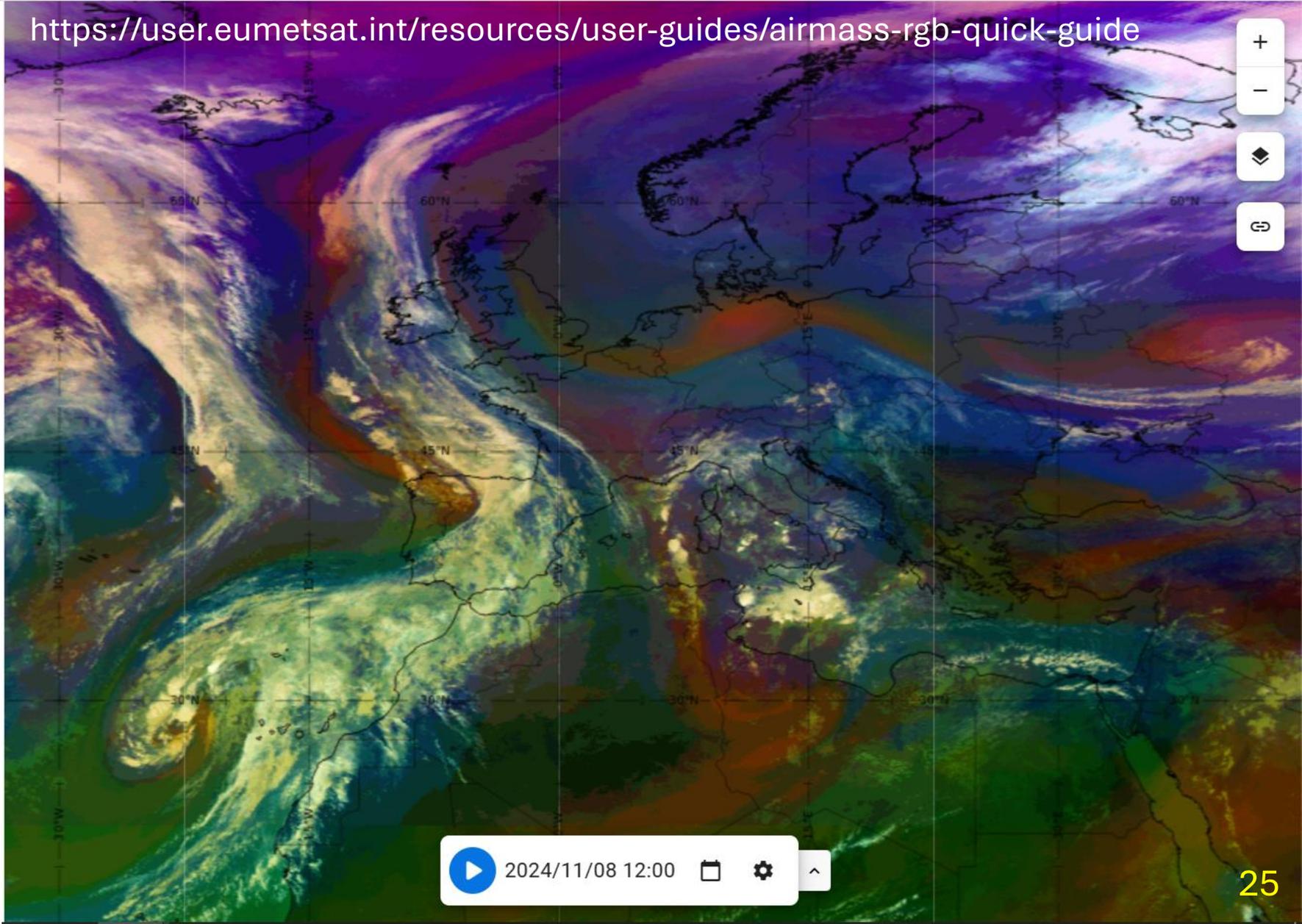


Producto de masas de aire

Meteosat Second Generation

MSG Airmass RGB: Producto que resalta las diferencias entre las masas de aire seco, tropical y frío.

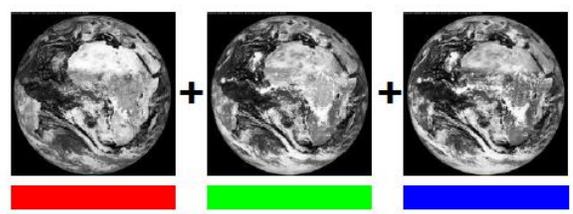
- Air masses:**
- 1 Cold, ozone rich polar air mass
 - 2 Warm, ozone poor tropical air masses (high upper tropospheric humidity)
 - 3 Warm air masses with low upper tropospheric humidity
 - 4 Dry air masses (indicating e.g. subsiding air, PV anomalies and the position of jet streams)
- Clouds:**
- 5 High-level thick clouds
 - 6 Mid-level ice and water clouds
 - 7 Low-level clouds: no specific colour, just the structure is visible, appears bluish in polar and greenish in tropical air masses.



Producto de color natural

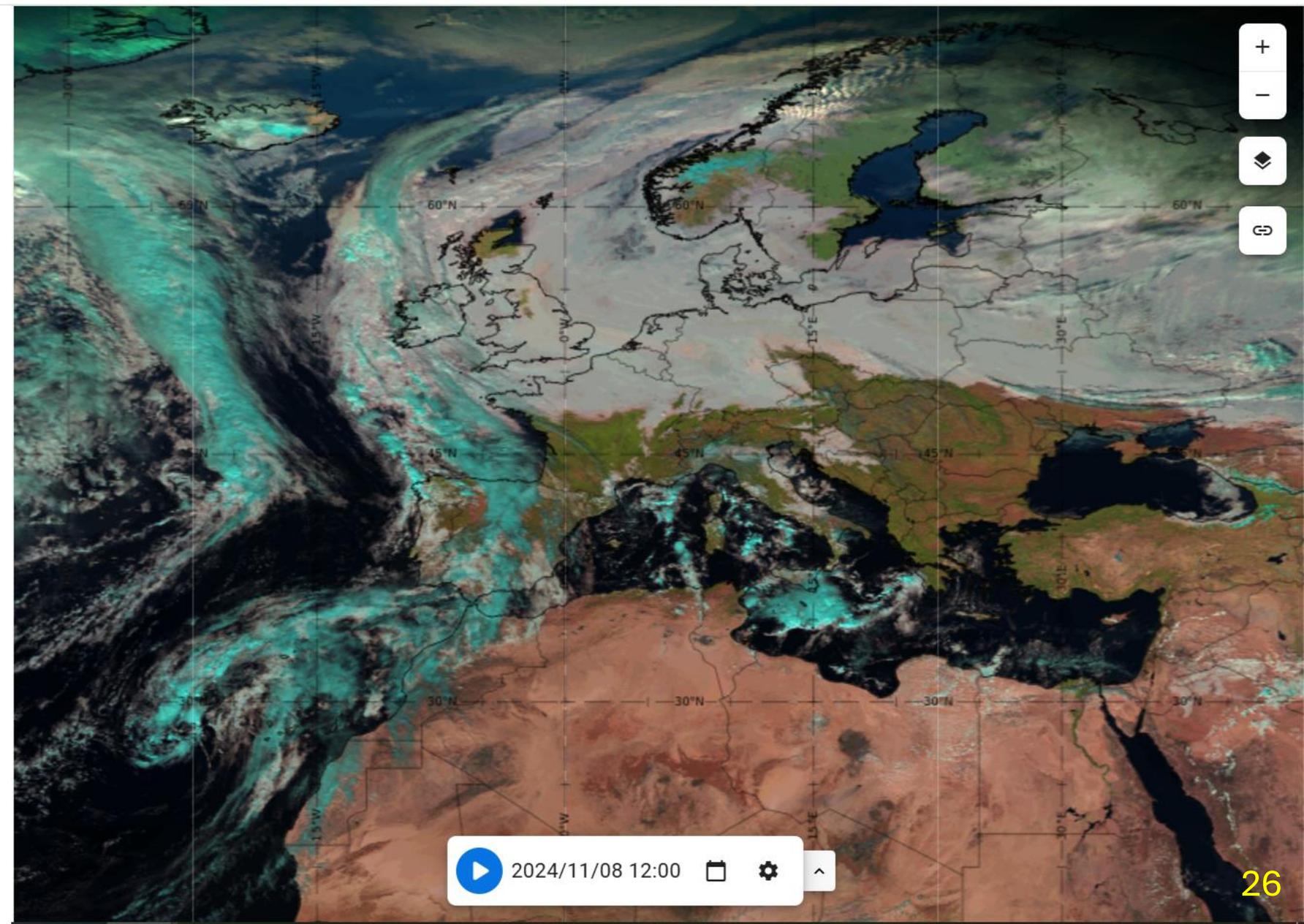
Meteosat Second Generation

MSG Day Natural Colours



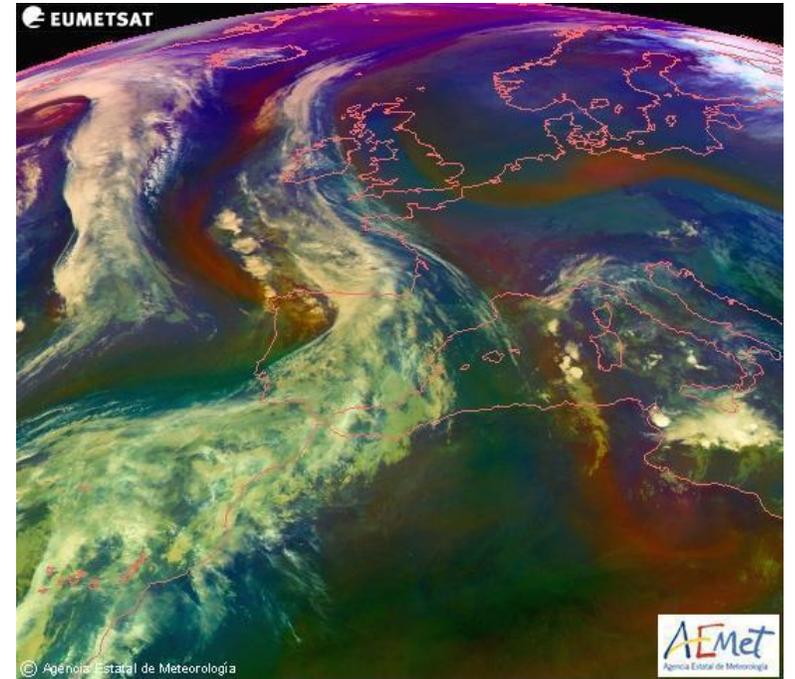
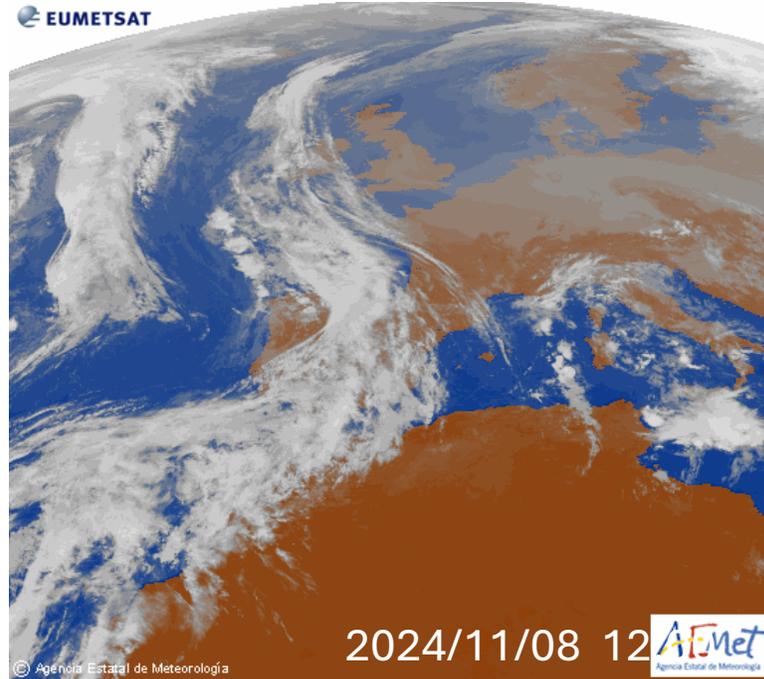
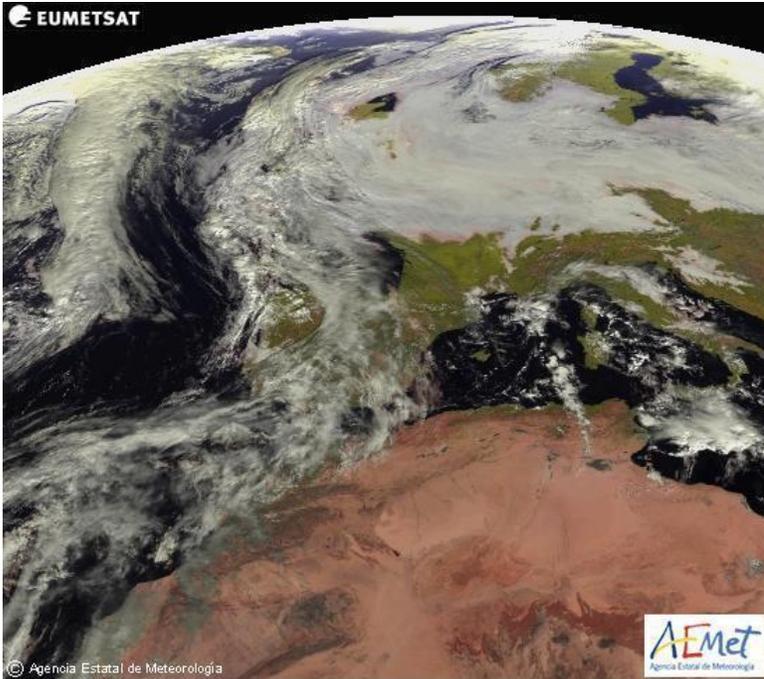
El color natural RGB (rojo, verde y azul) utiliza tres canales solares: NIR1.6, VIS0.8 y VIS0.6.

- **Vegetación:** Aparece verdosa debido a su gran reflectancia en el canal VIS0.8 (verde) en comparación con los canales NIR1.6 (rojo) y VIS0.6 (azul).
- **Nubes de agua con pequeñas gotas:** Tienen una gran reflectancia en los tres canales y, por tanto, aparecen blanquecinas.
- **Nubes de nieve y hielo:** En cian porque el hielo absorbe fuertemente en NIR1.6 (no rojo).
- **Suelo desnudo:** Aparece marrón debido a la mayor reflectancia en NIR1.6 que en VIS0.6.
- **Océano:** Aparece negro debido a la baja reflectancia en los tres canales.



¿Qué ve un satélite meteorológico?

Producto derivado



Longitud de onda visible

Longitud de onda infrarroja

Producto de masas de aire

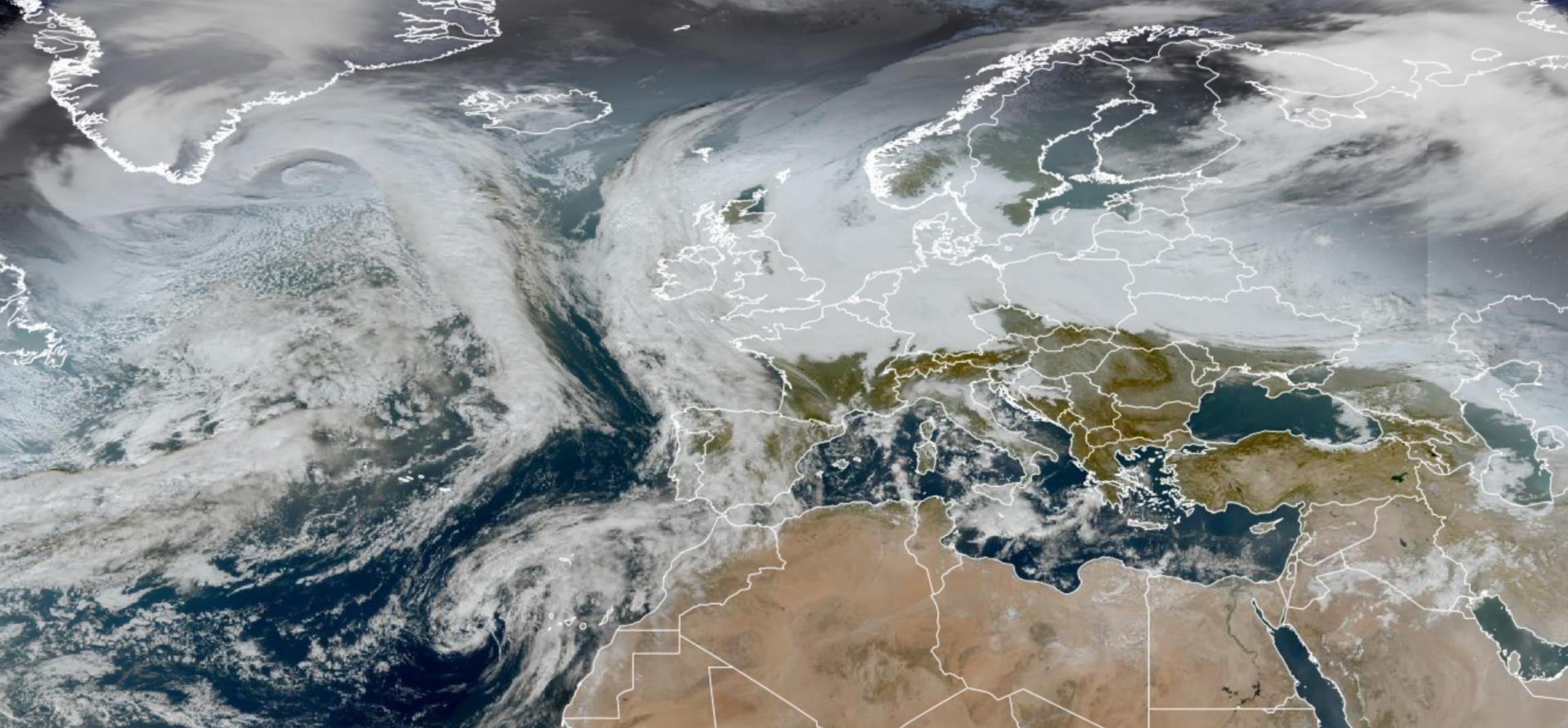
Estas observaciones y productos provienen de Meteosat Second Generation (MSG)

Nueva generación de satélites geoestacionarios: Meteosat Third Generation (MTG)

<https://www.eumetsat.int/meteosat-third-generation>

- Resolución espacial: ~1 km
- Resolución temporal: 10 minutos
- Sondeos verticales

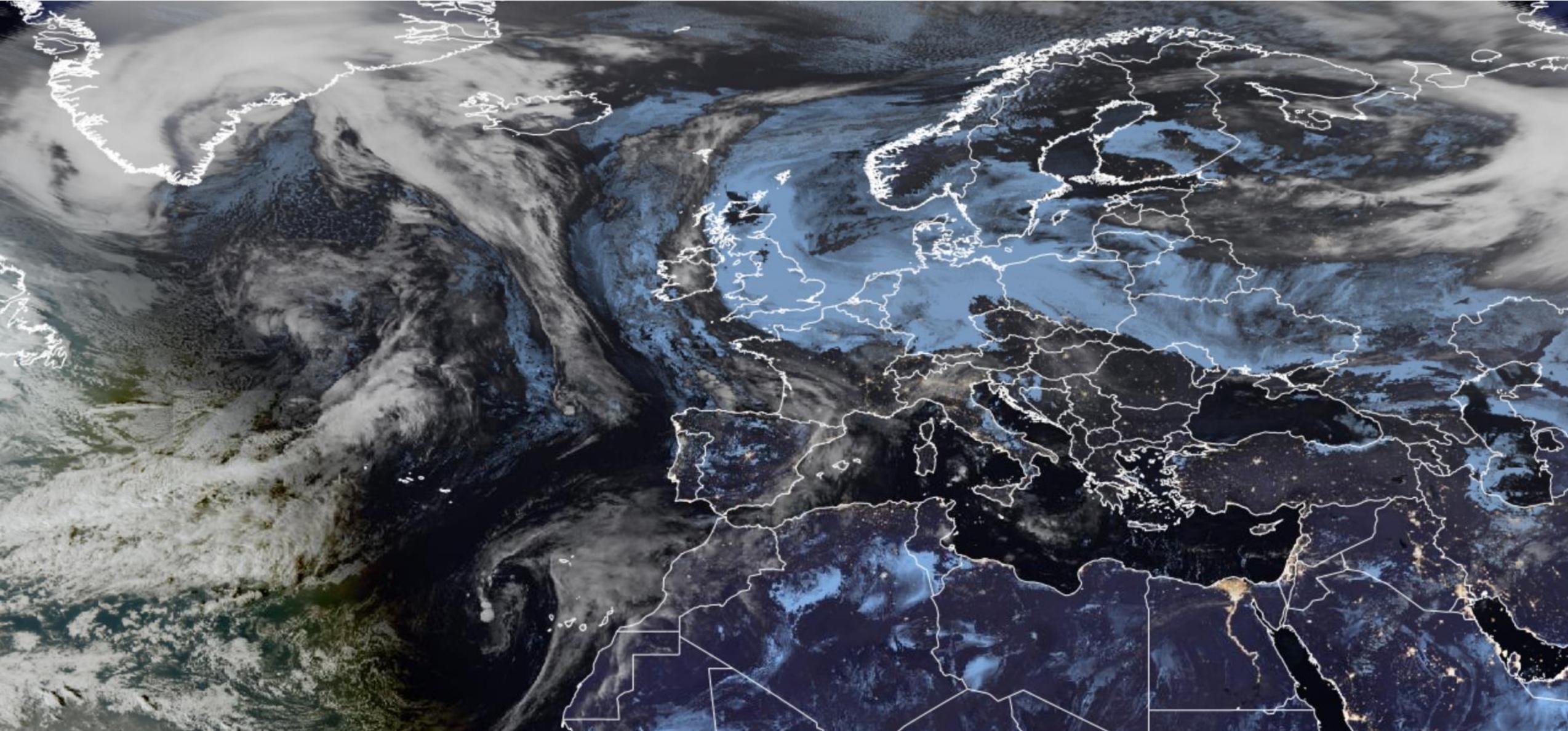
Meteosat Third Generation (MTG)



True Colour RGB - MTG - 0 degree

2024/11/08 12:00

Meteosat Third Generation (MTG)



True Colour RGB - MTG - 0 degree

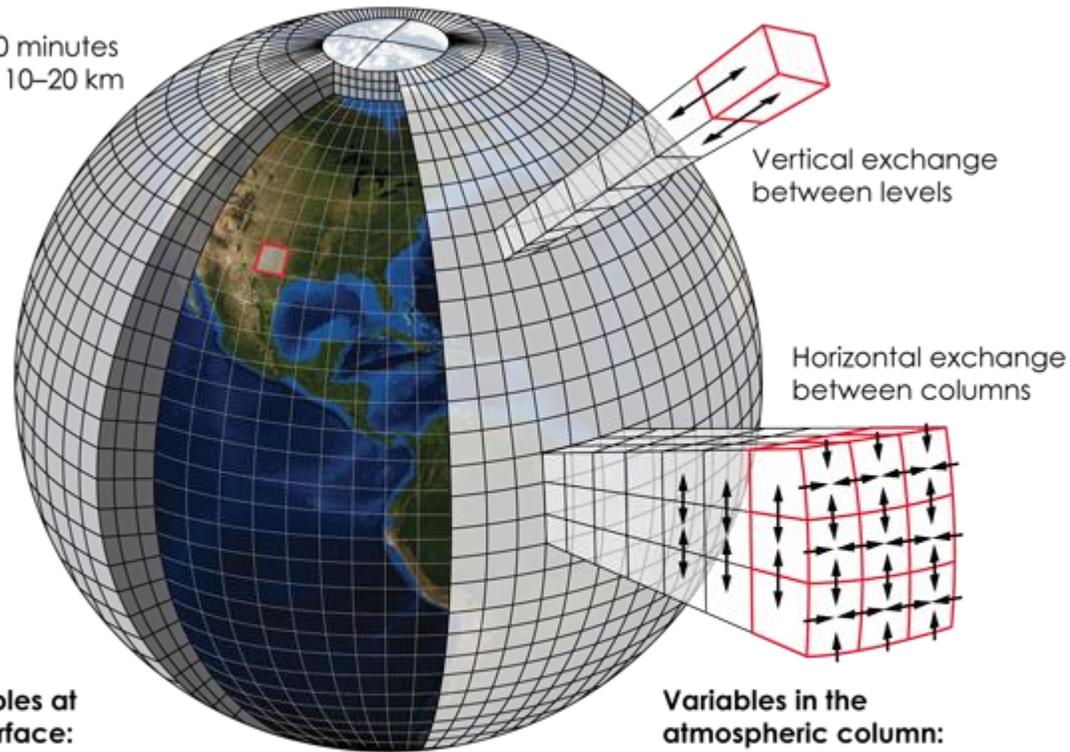
2024/11/08 18:40

3. Uso de los datos de satélite en la predicción operativa meteorológica

Los modelos meteorológicos son imperfectos

Weather forecast modeling

Timestep 5–10 minutes
Grid spacing 10–20 km

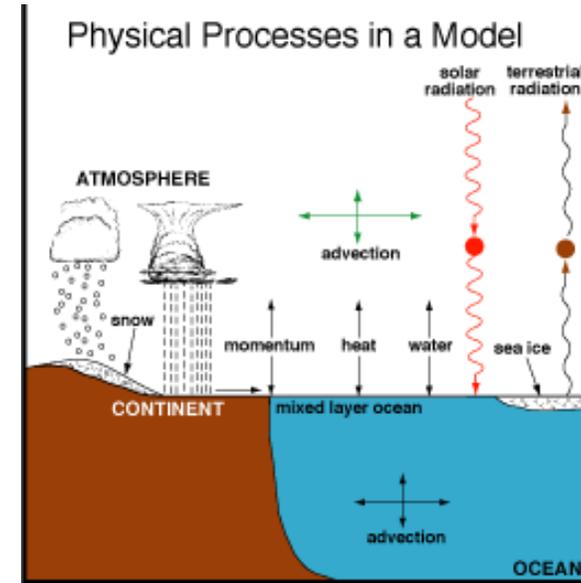


Variables at the surface:

Temperature
Humidity
Pressure
Moisture fluxes
Heat fluxes
Radiation fluxes

Variables in the atmospheric column:

Wind vectors
Humidity
Clouds
Temperature
Height
Precipitation
Aerosols

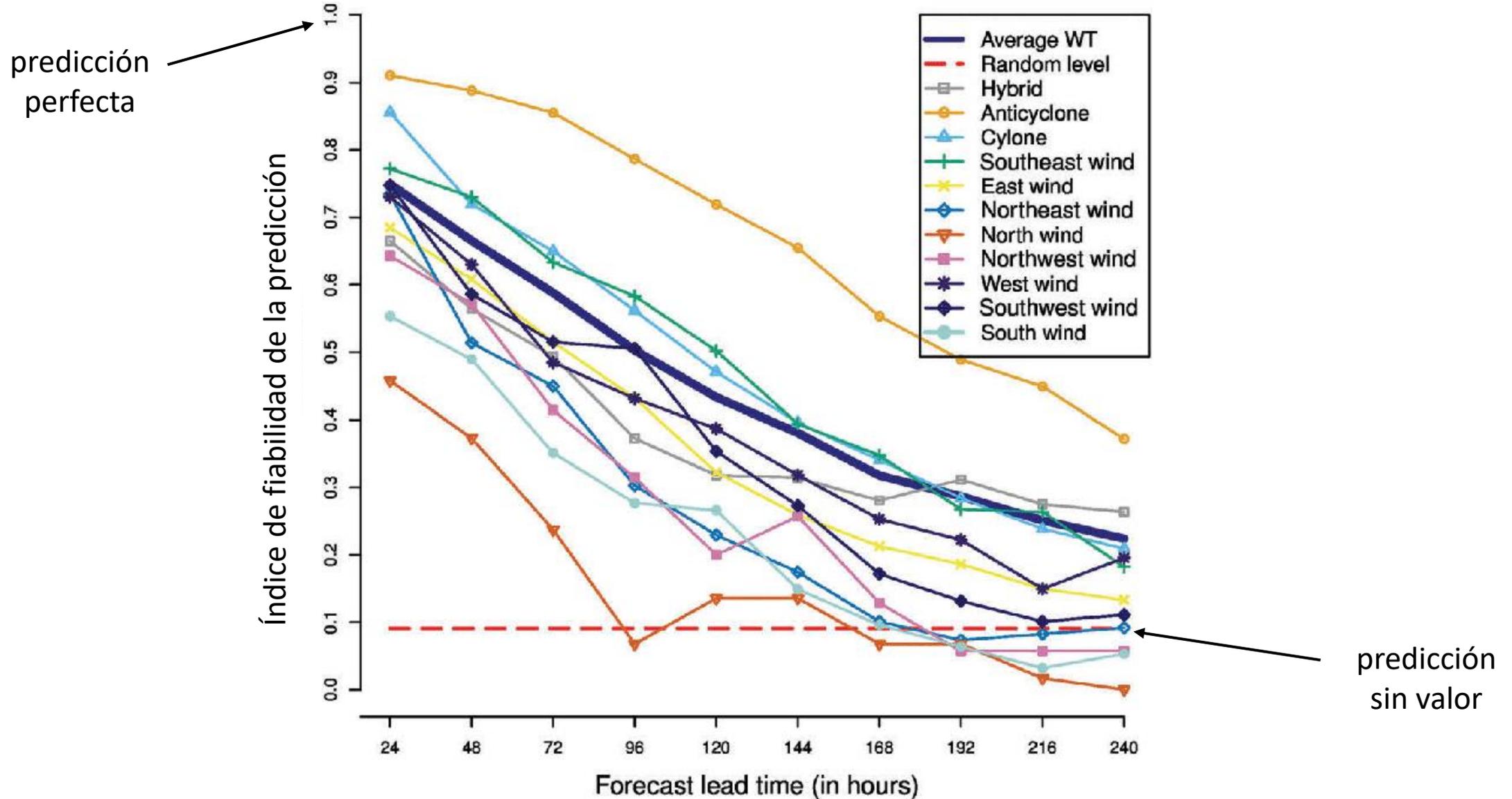


Principales problemas de la predicción meteorológica:

- Condiciones iniciales
- Resolver ecuaciones no lineales sin solución analítica

(La atmósfera es muy caótica, con lo que pequeños errores en la determinación del estado inicial o en la resolución de ecuaciones dan lugar a estados del tiempo muy diferentes)

Los modelos meteorológicos son imperfectos



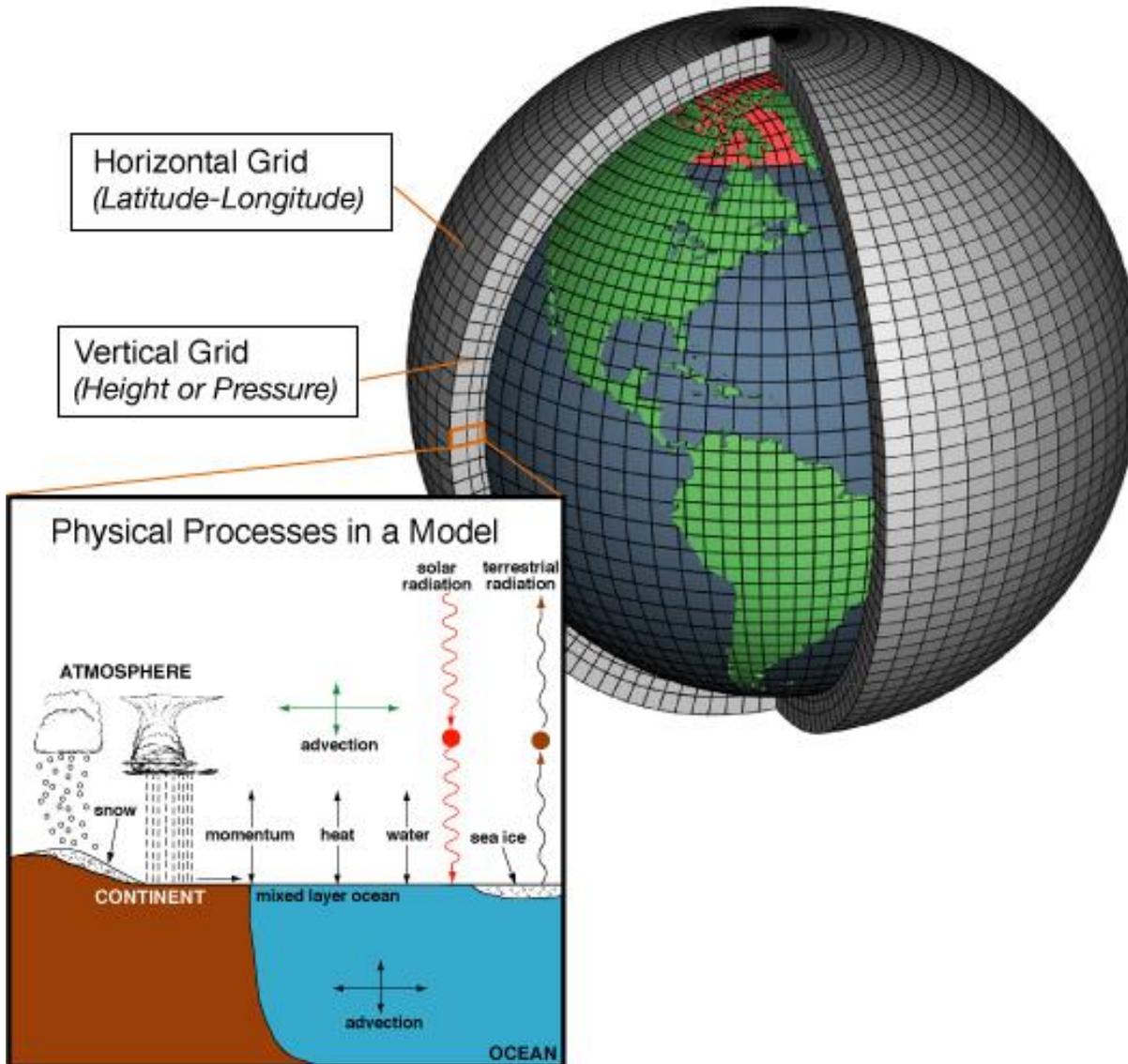
Los modelos meteorológicos son imperfectos

Principales problemas de la predicción meteorológica:

- Condiciones iniciales
- Resolución de ecuaciones no lineales

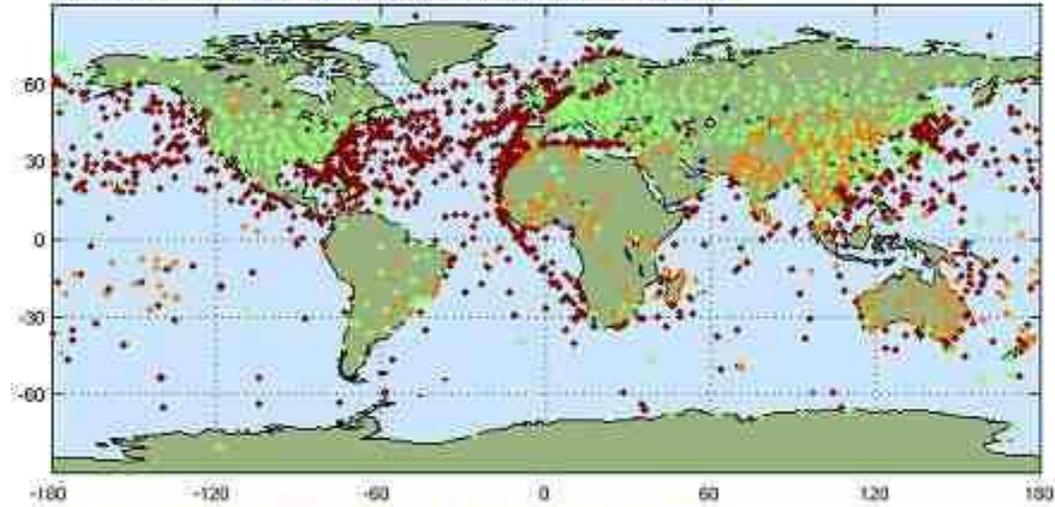
Soluciones:

- Mejorar las **parametrizaciones de procesos** en los modelos.
 - Aumentar la **resolución espacial** (ej. mediante técnicas de anidado).
 - Usar “**ensembles**” (distintas simulaciones de un modelo) para hacer una predicción probabilística.
- **Asimilación de datos:** Fusionar observaciones con modelos mediante procedimientos matemáticos para mejorar las condiciones iniciales y la predicción física del modelo.

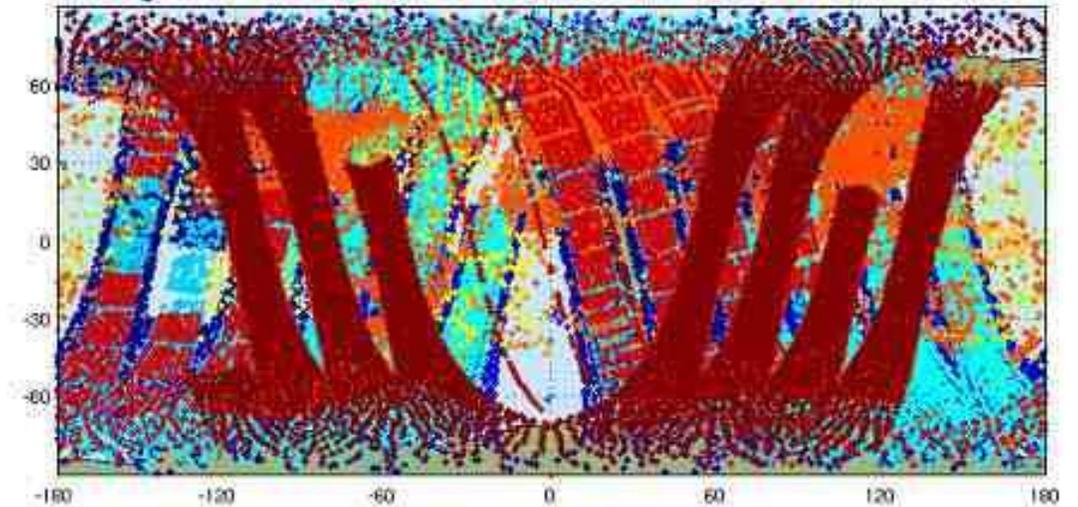


Asimilación de datos (procedentes de satélites y otras plataformas)

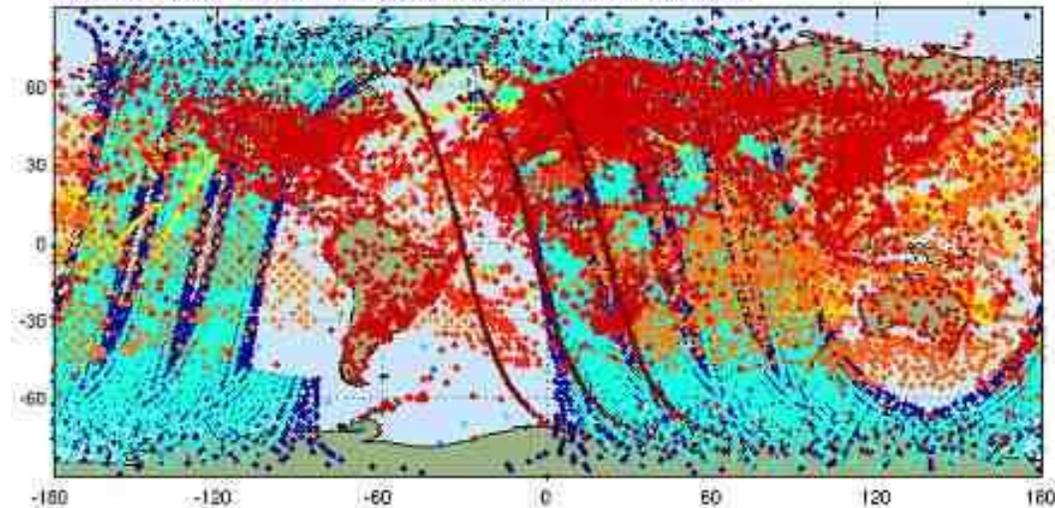
07-Jan-1973 12UTC All data: 77098 observations



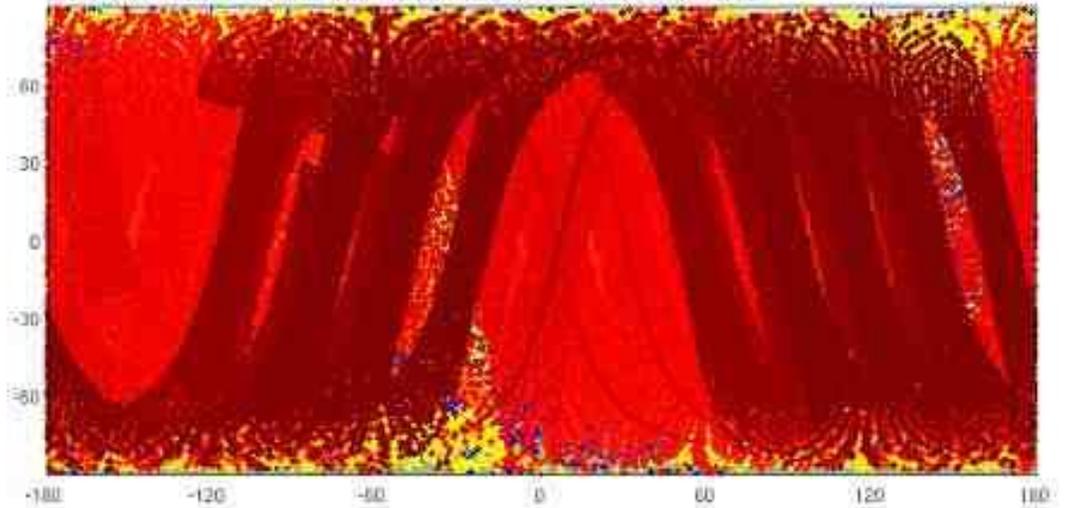
02-Aug-1987 12UTC All data: 550602 observations



07-Jan-1979 12UTC All data: 325765 observations

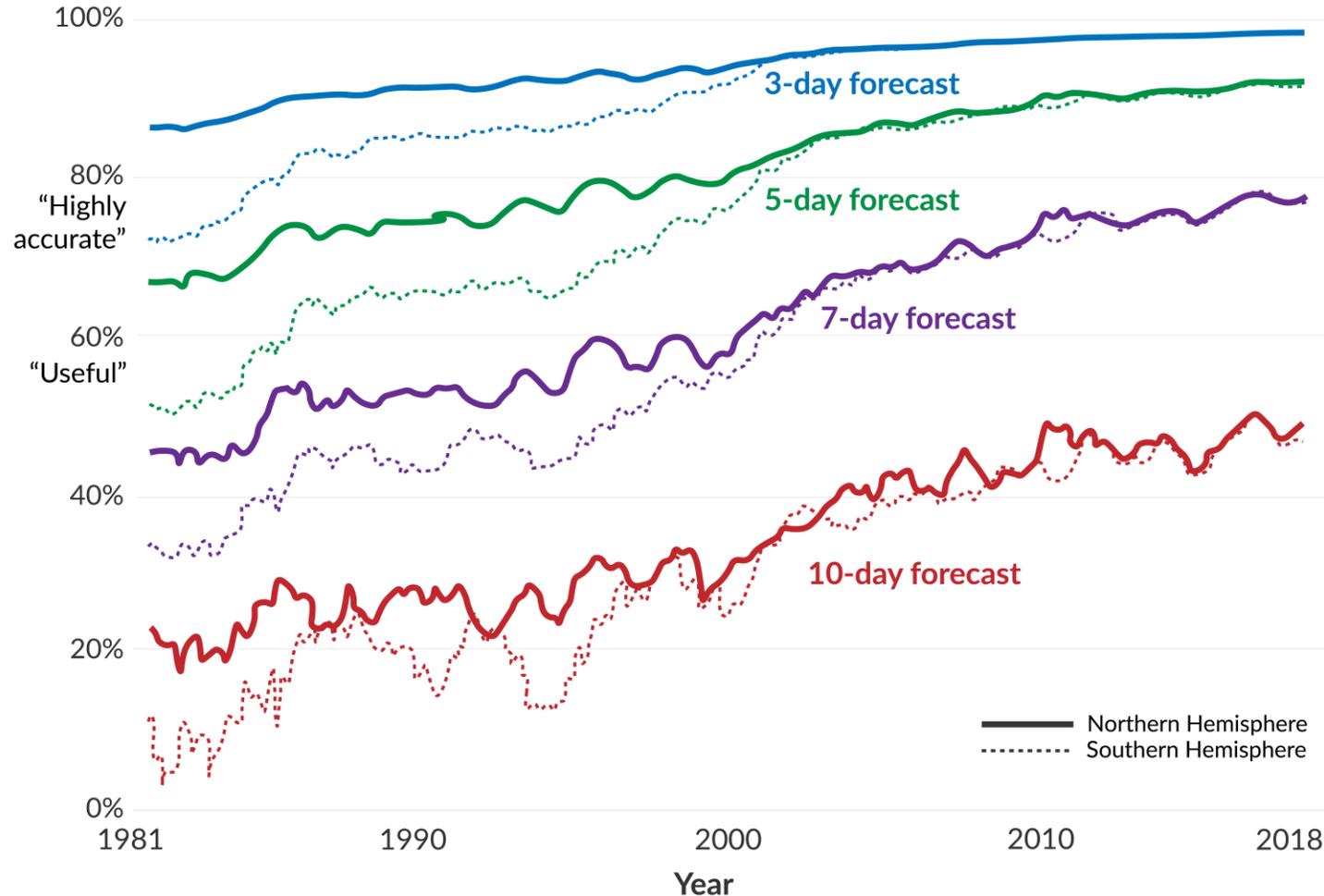


07-Jan-2006 12UTC All data: 4217655 observations



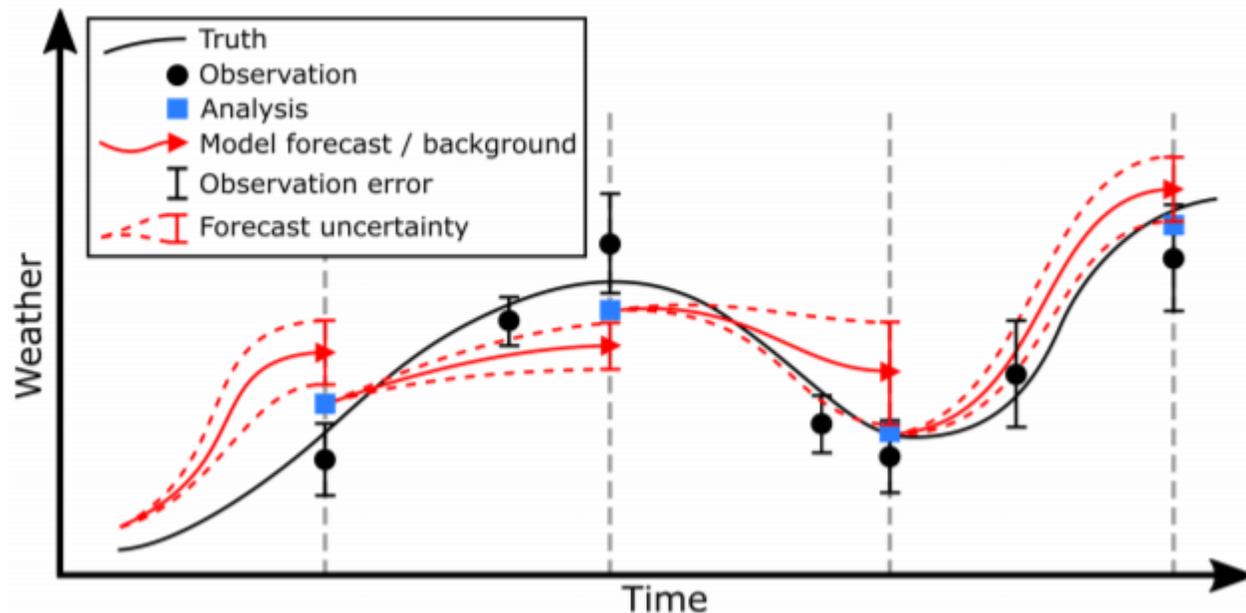
La precisión de las predicciones meteorológicas ha mejorado

La precisión se mide a partir de la diferencia entre las predicciones y el estado posterior de la atmósfera, basándose en el geopotencial a 500 hPa.



Parte de las mejoras se deben a la **asimilación de datos (procedentes de satélites y otras plataformas)**, que ha permitido mejorar las condiciones iniciales.

Asimilación de datos (procedentes de satélites y otras plataformas)



Aplicaciones:

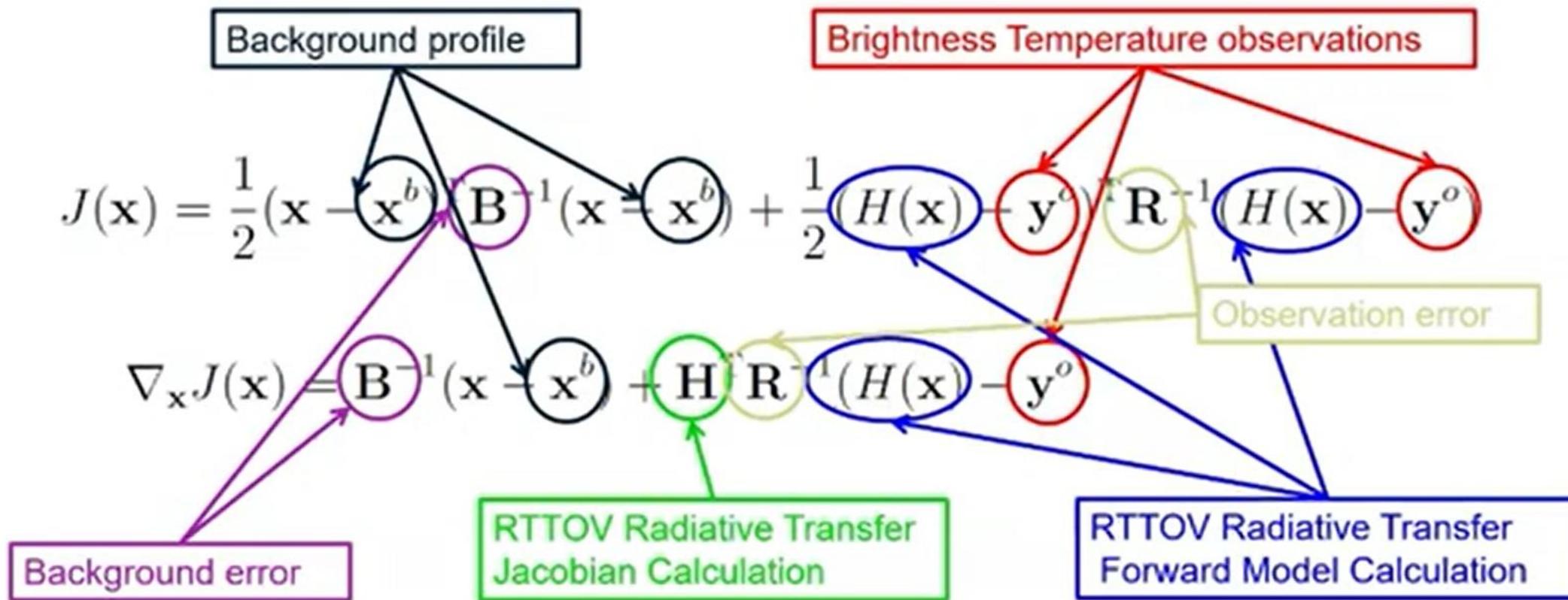
1. Desarrollada inicialmente con el único propósito de **crear condiciones iniciales** para **mejorar la predicción meteorológica en tiempo real**.
2. **Reanálisis meteorológicos.** Simulación del tiempo pasado con un modelo meteorológico, asimilando un gran número de observaciones, para reproducir el estado real de la atmósfera.

En 1997, el **sistema de asimilación de datos incremental variacional cuatridimensional (4D-Var)** entró en funcionamiento en el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF).

Este sistema permite combinar una previsión a corto plazo con observaciones para obtener la mejor estimación posible del estado actual de la atmósfera. De este modo se obtienen las condiciones iniciales para una nueva previsión.

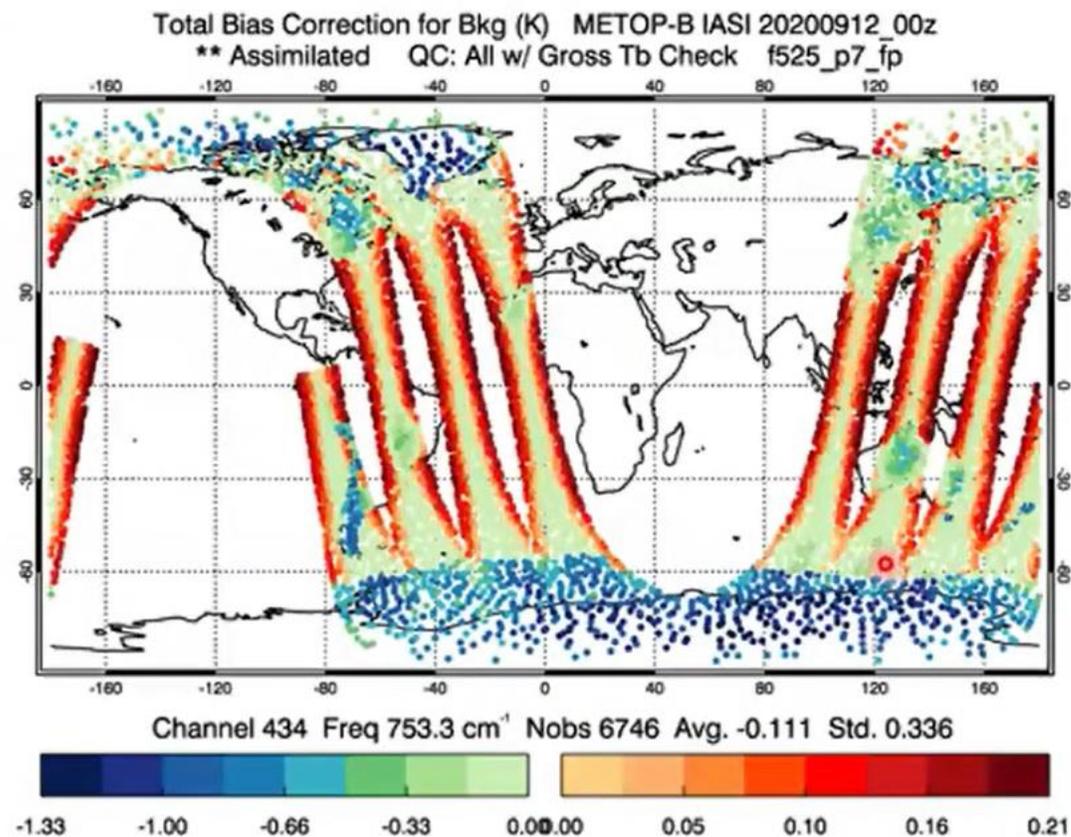
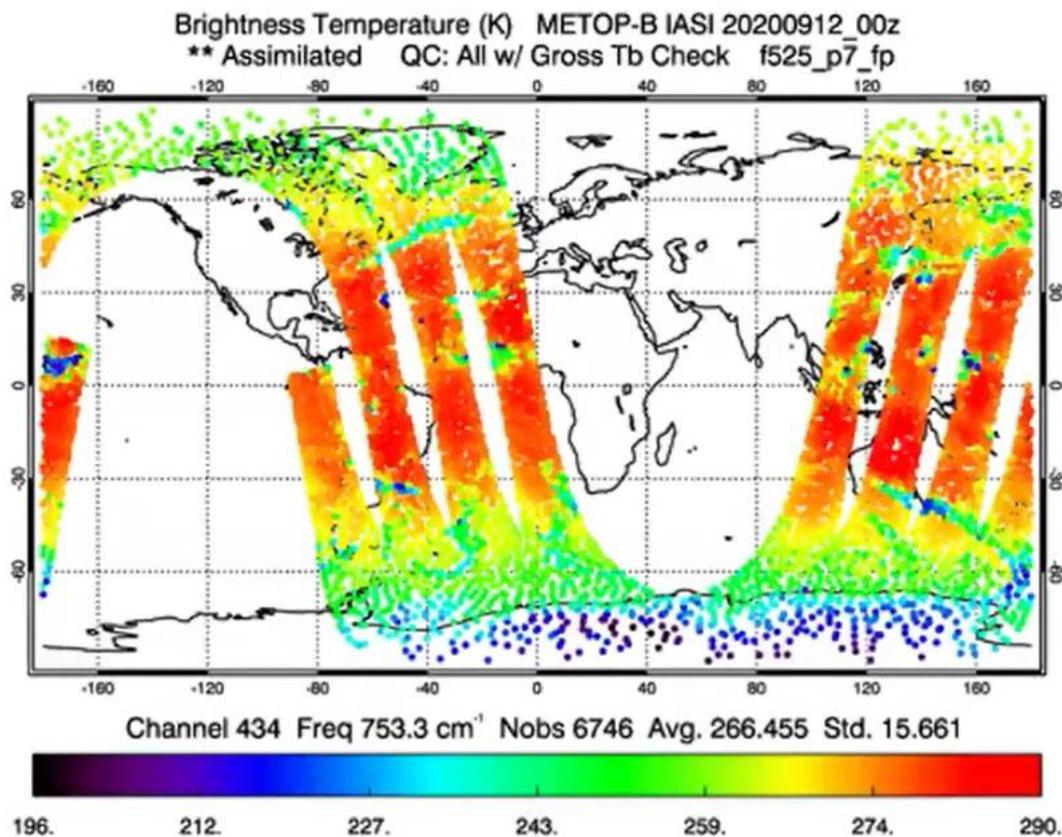
<https://www.ecmwf.int/en/newsletter/175/earth-system-science/linearised-physics-heart-ecmwfs-4d-var>

Asimilación de datos (procedentes de satélites y otras plataformas)

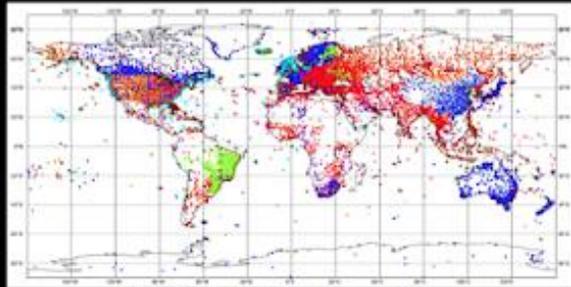


Asimilación de datos (procedentes de satélites y otras plataformas)

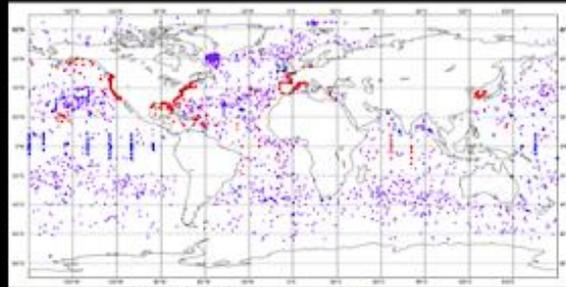
- Metop-B IASI Channel 434 Brightness temperature and bias correction
- images from NASA Goddard GMAO instrument monitoring webpage



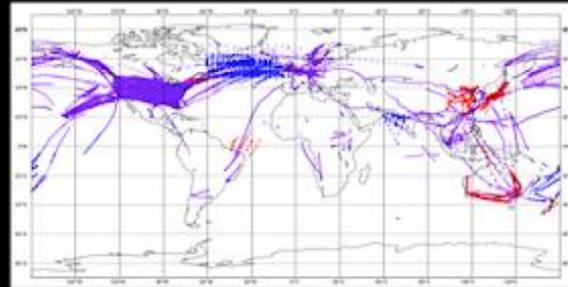
What Goes into a Weather Model?



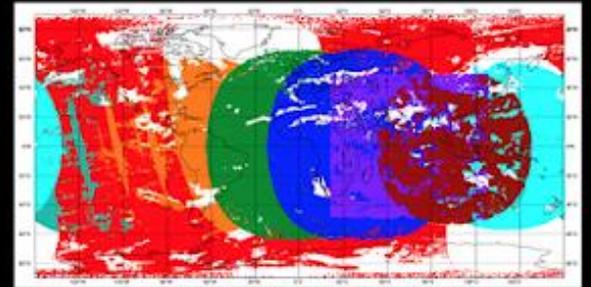
122,111 Surface Obs



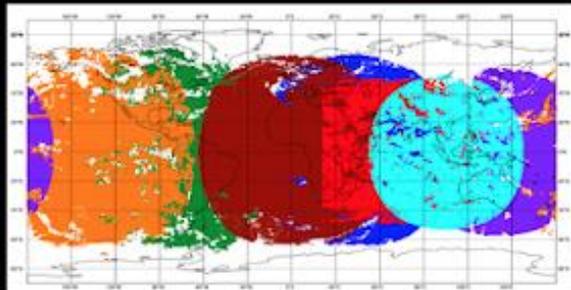
2,201 Buoy Obs



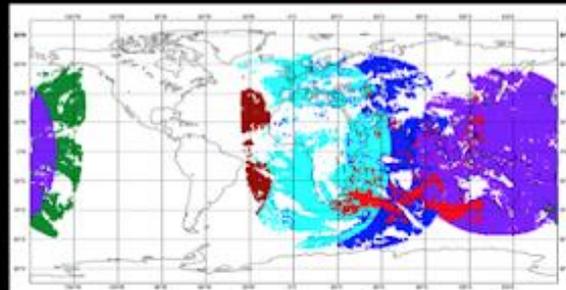
79,263 Aircraft Obs



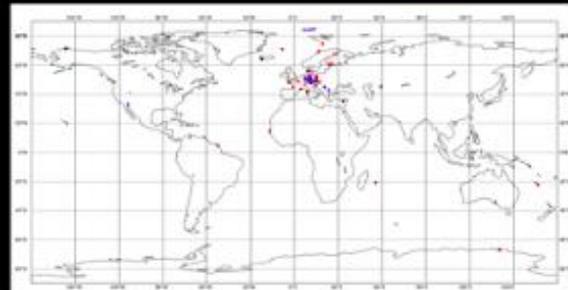
1,314,580 IR Wind Obs



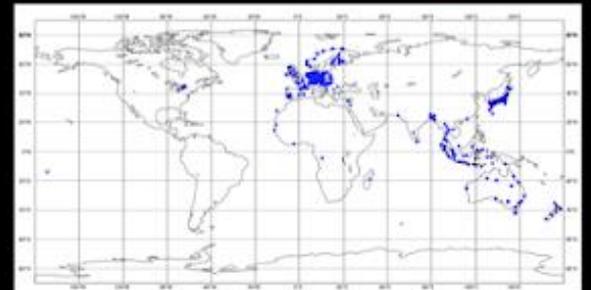
932,486 WV Wind Obs



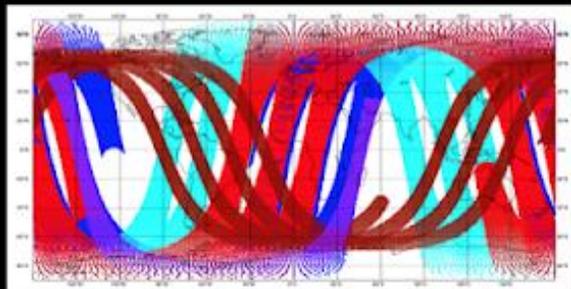
391,771 VIS Wind Obs



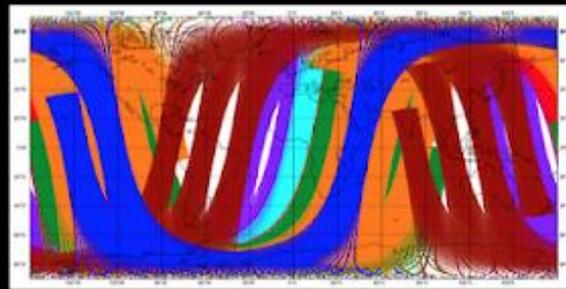
53 Weather Balloon Obs



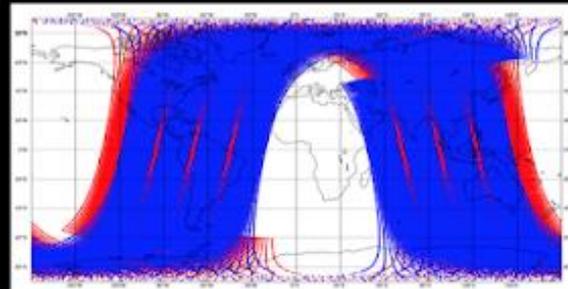
3,069 PILOT Obs



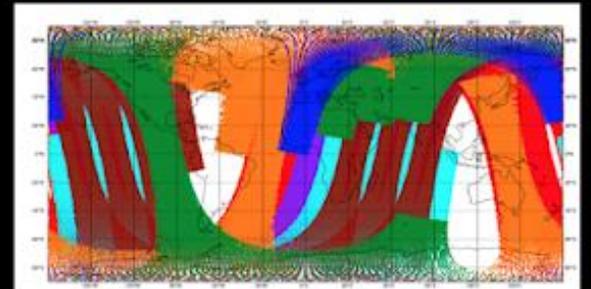
155,294 Microwave Obs



604,163 AMSU-A Obs

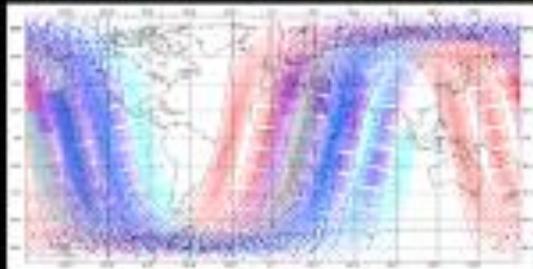


163,819 ATMS Obs

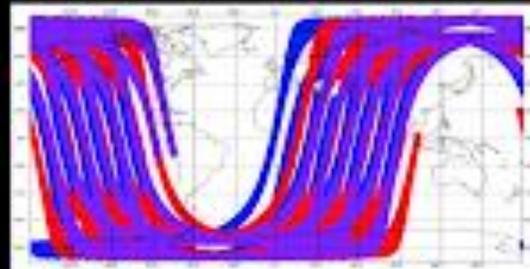


278,775 ATMS Obs

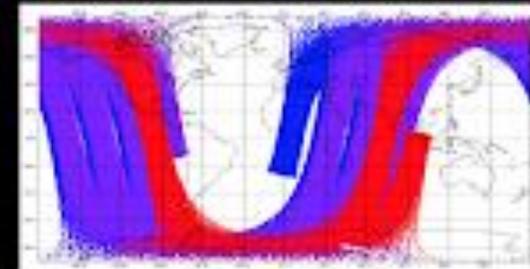
What Goes into a Weather Model?



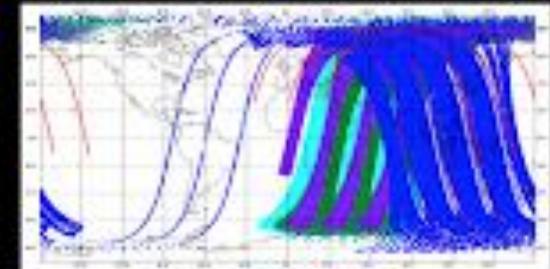
27,627 HIRS Obs



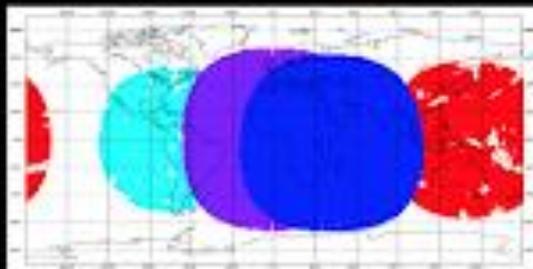
768,711 Scatterometer Obs



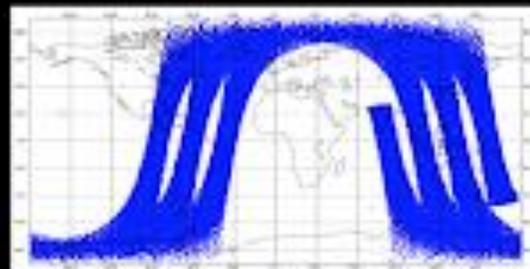
180,328 IASI Obs



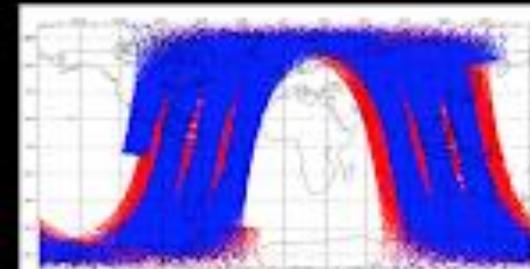
92,744 RESAT Obs



1,354,204 GEOS Radiance Obs



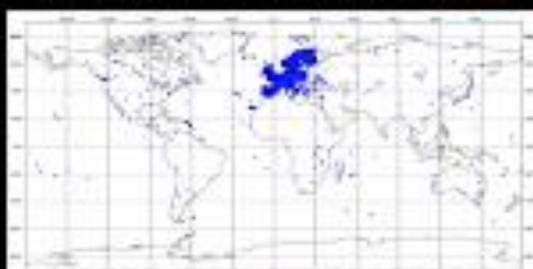
71,305 AIRS Obs



153,330 CRIS Obs



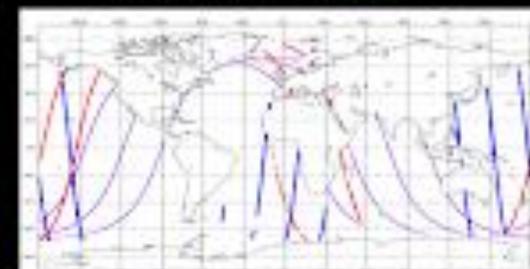
43,353 GPSRO Obs



150,816 Ground-Based GPS Obs



14,442 NEXRAD Precip Obs



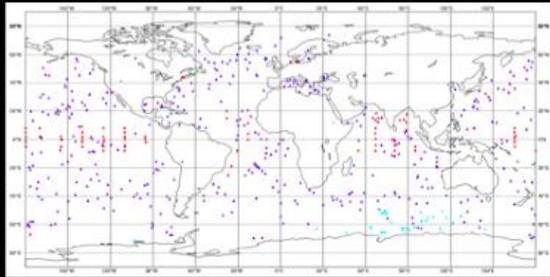
2,507 Wave Height Obs



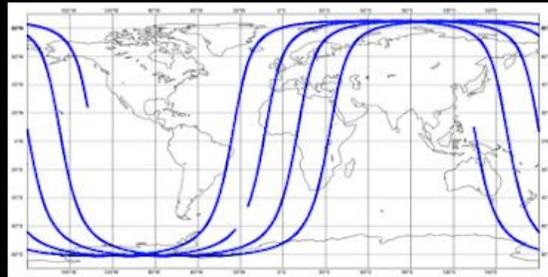
562 Salinity Obs

<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/monitoring/dcover?facets=undefined&time=2020040306,0,2020040306&obs=synop-ship&Flag=all>, 0600 UTC 3 Apr 2020 IFS Forecast

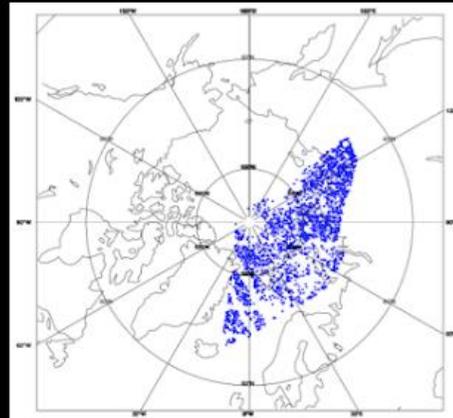
What Goes into a Weather Model?



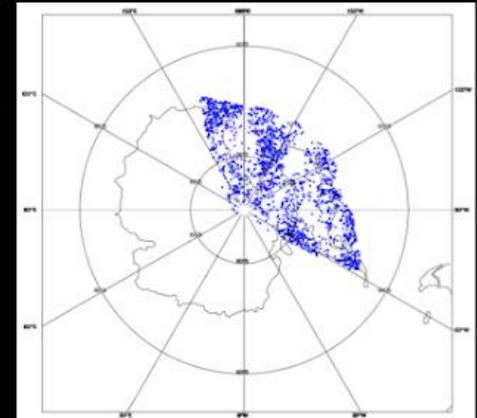
552 Potential Temperature Obs



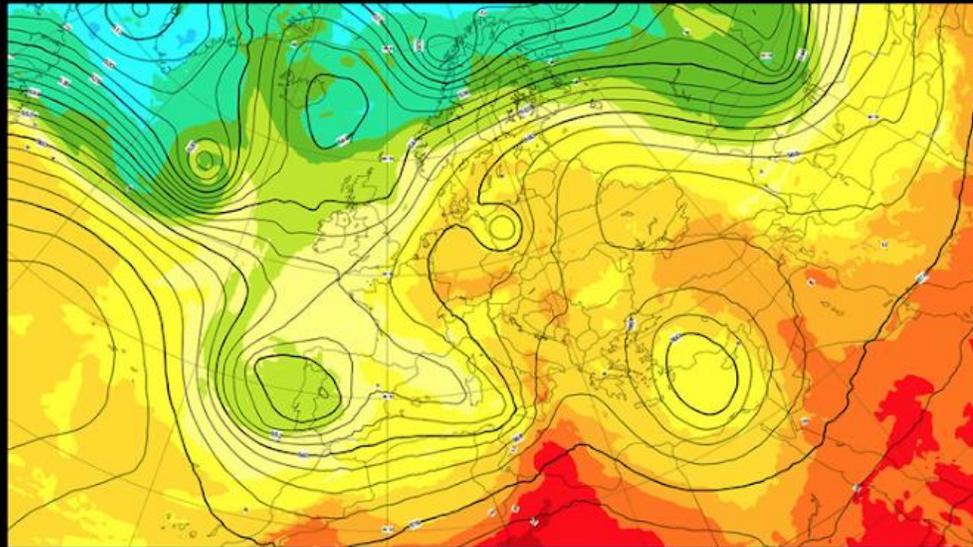
311,294 AEOLUS Obs



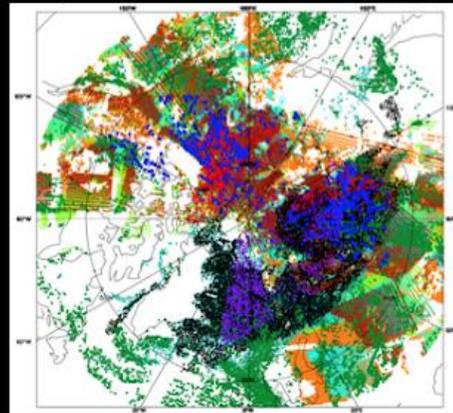
2,218 NH WV Polar Obs



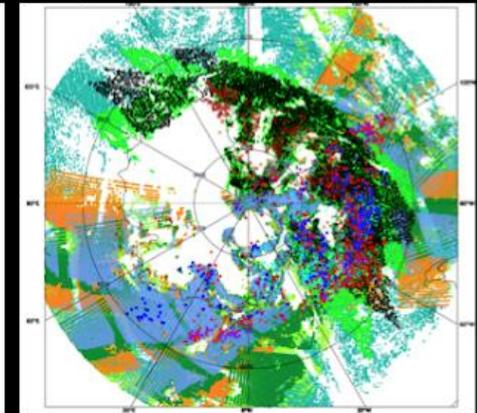
1,653 SH WV Polar Obs



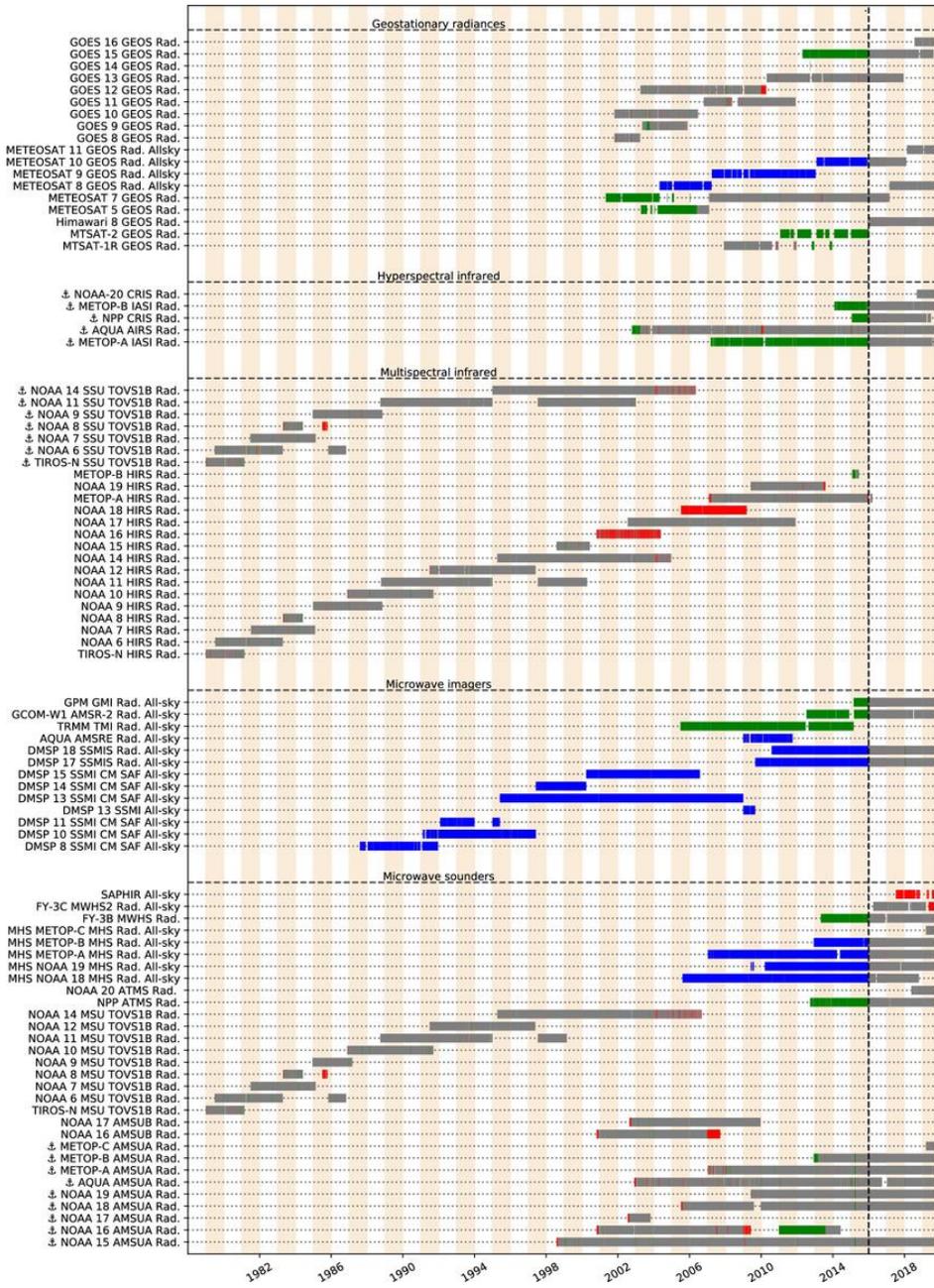
Prior Short-Range (12-hour) Forecast



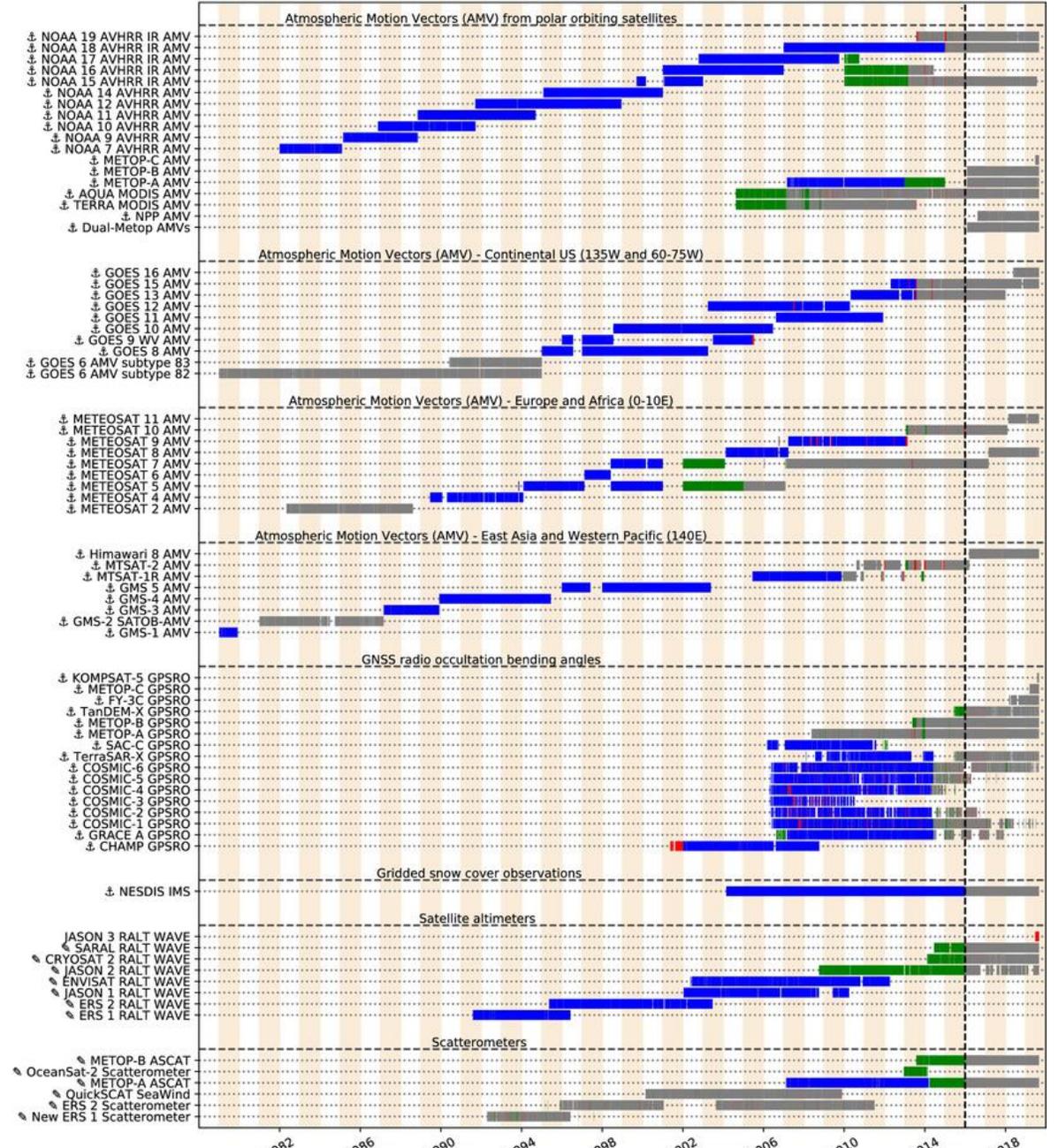
166,204 NH IR Polar Obs



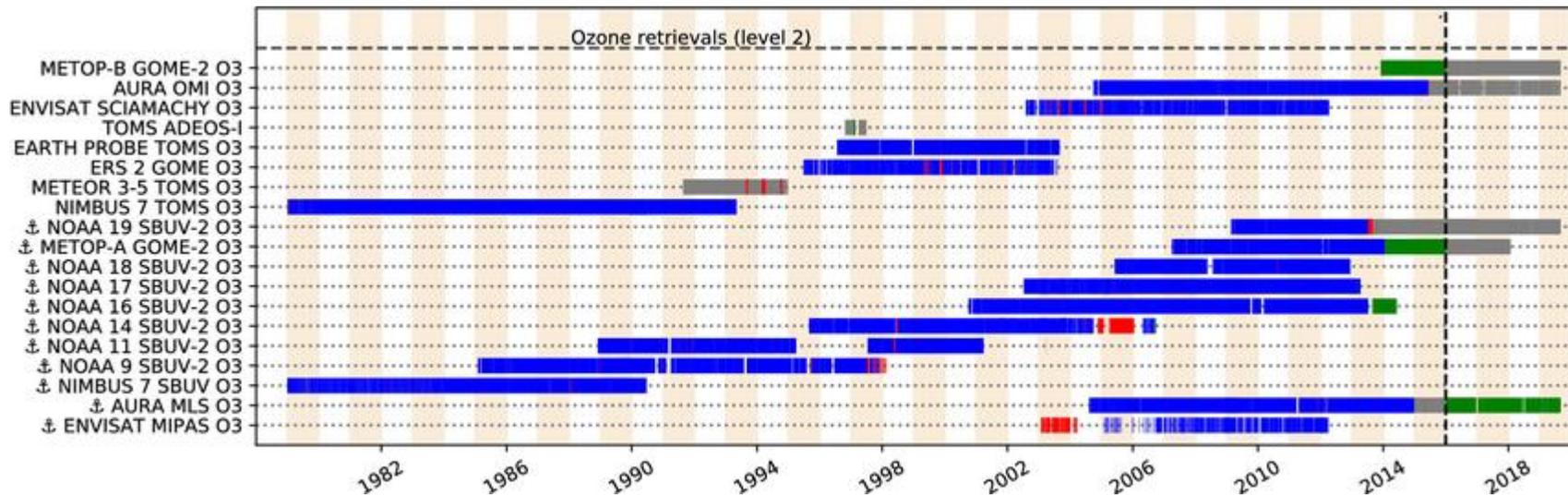
183,499 SH IR Polar Obs



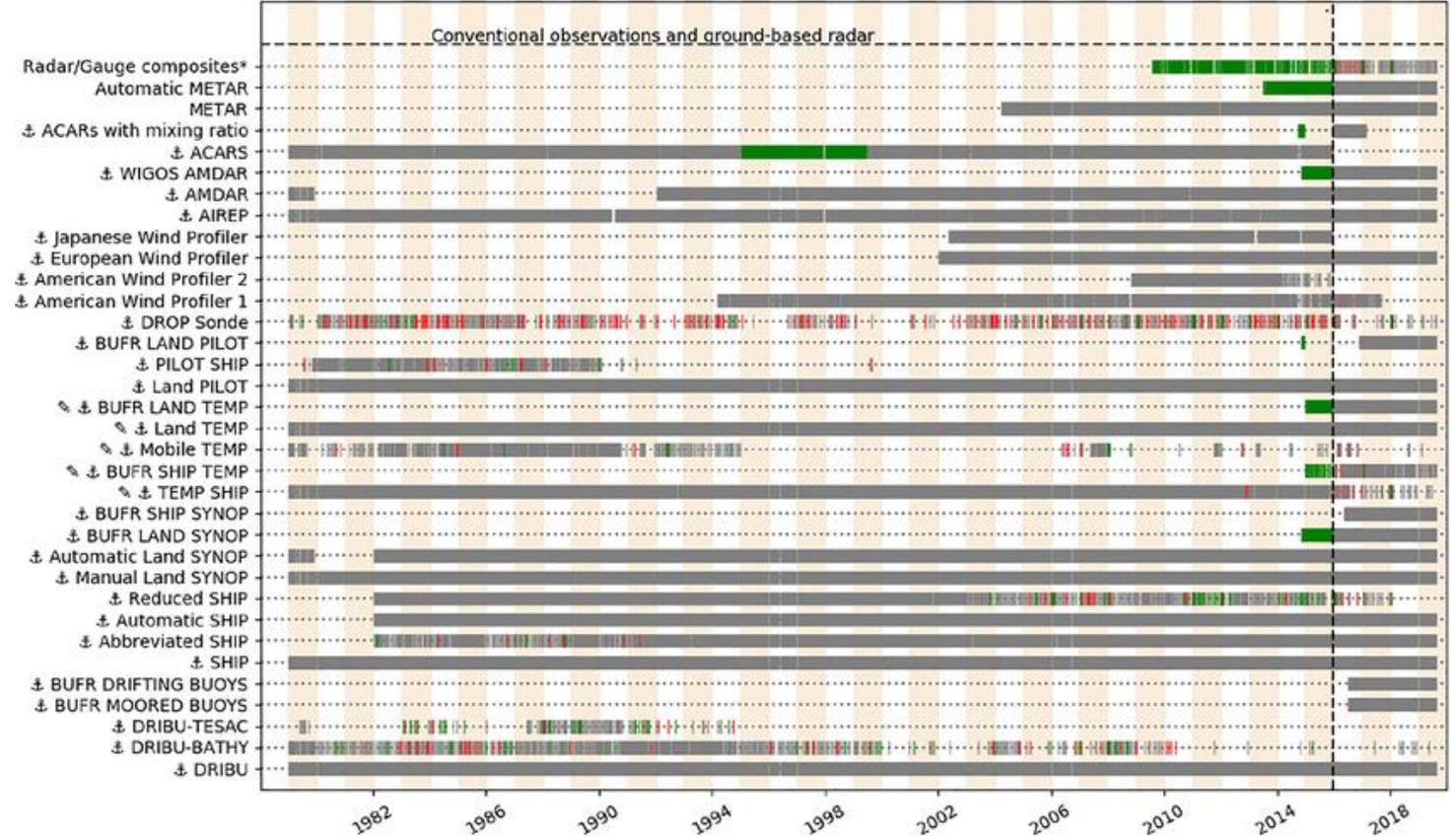
Observaciones de radiancia asimiladas en el reanálisis ERA5



Otras observaciones de satélite asimiladas en ERA5



Observaciones de ozono asimiladas en ERA5



Observaciones convencionales asimiladas en ERA5

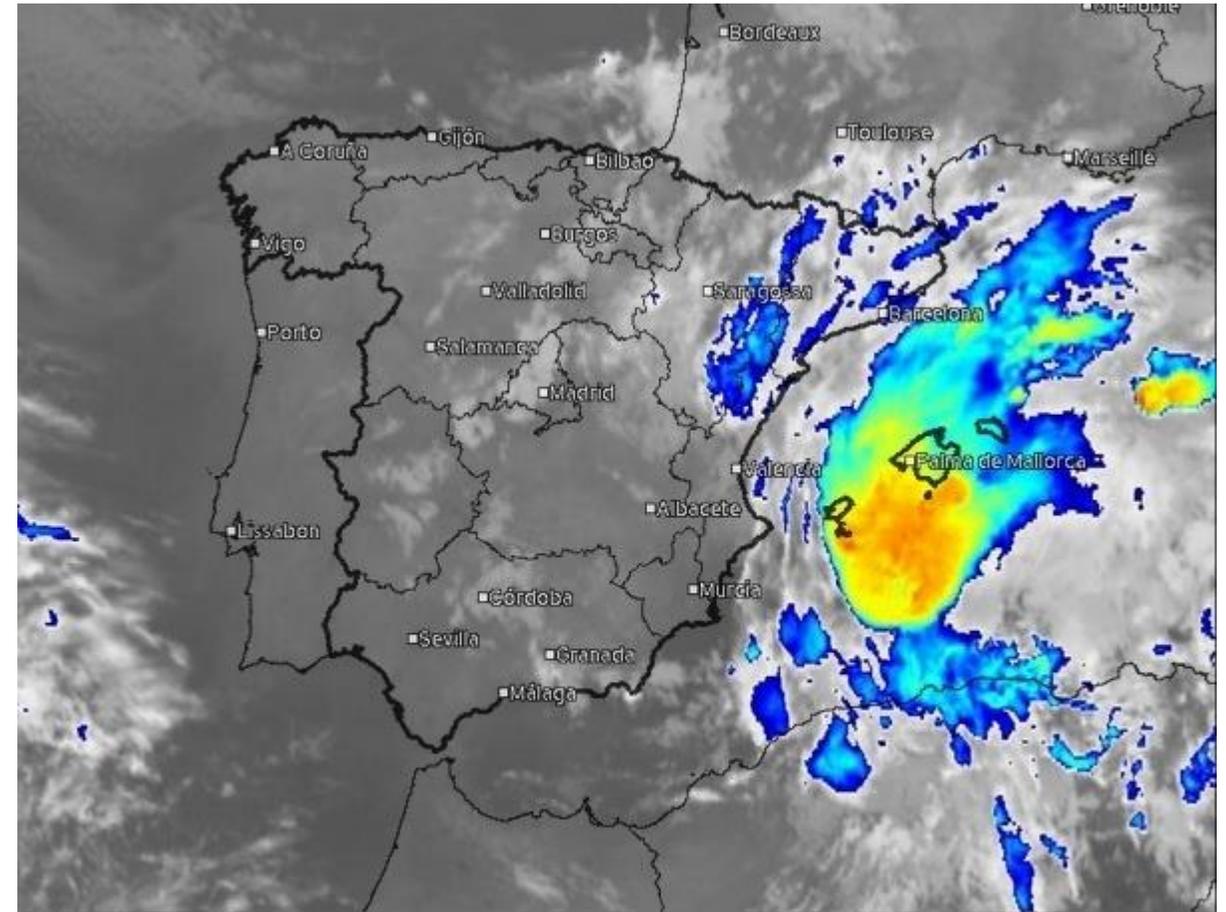
4. Ejemplos de otros productos derivados de satélites de observación de la Tierra

Productos derivados / Temperatura de la cima de las nubes

Imagen en el IR térmico (convertida a T)

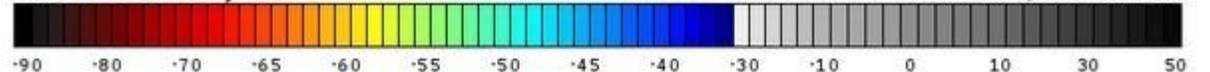
Emisión en el infrarrojo hacia el exterior de la atmósfera (W m^{-2}) $\sim \sigma T^4$

Se han realzado los topes fríos para mostrar el tamaño e intensidad de un **complejo convectivo de mesoescala**.

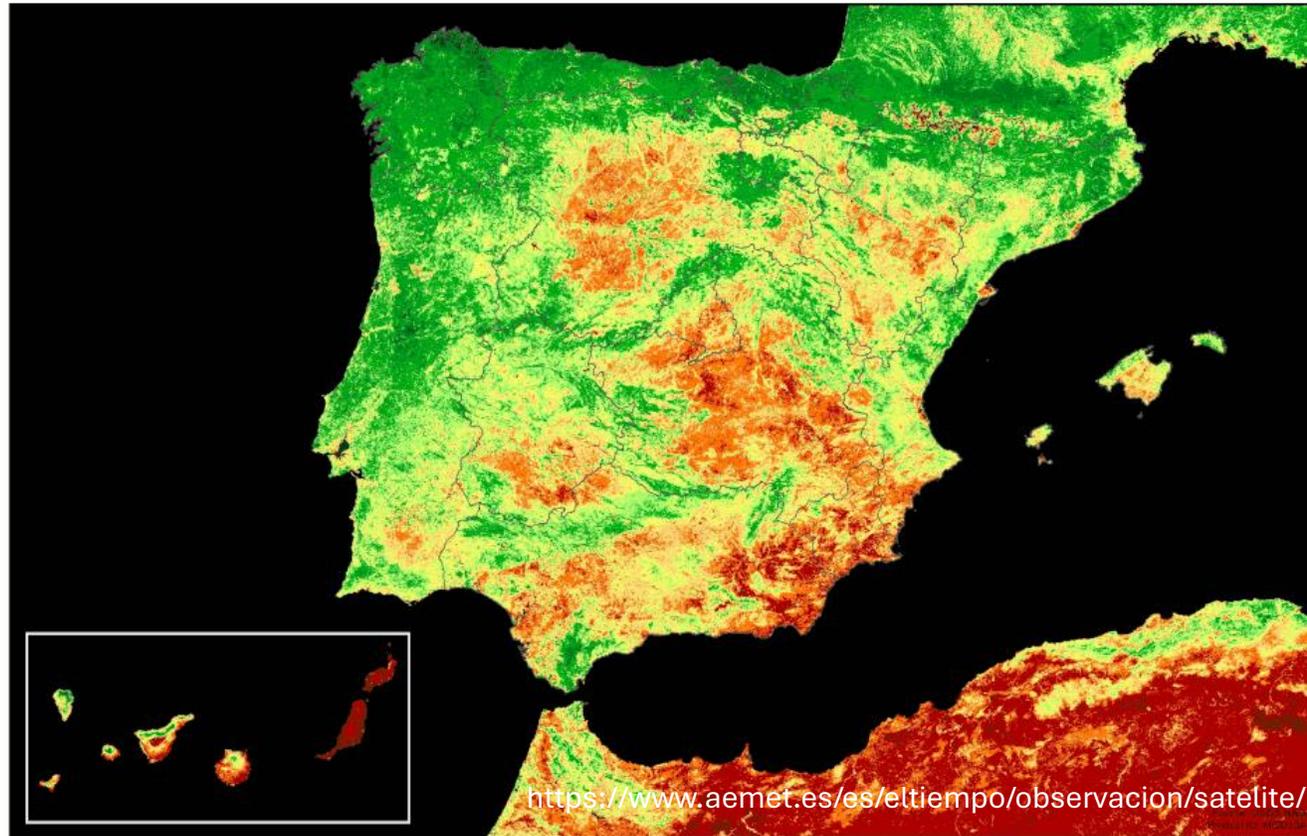


Satellit Top Alarm (°C)

30.09.2015, 05:35 Uhr MESZ



Productos derivados / Índice de vegetación



ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI

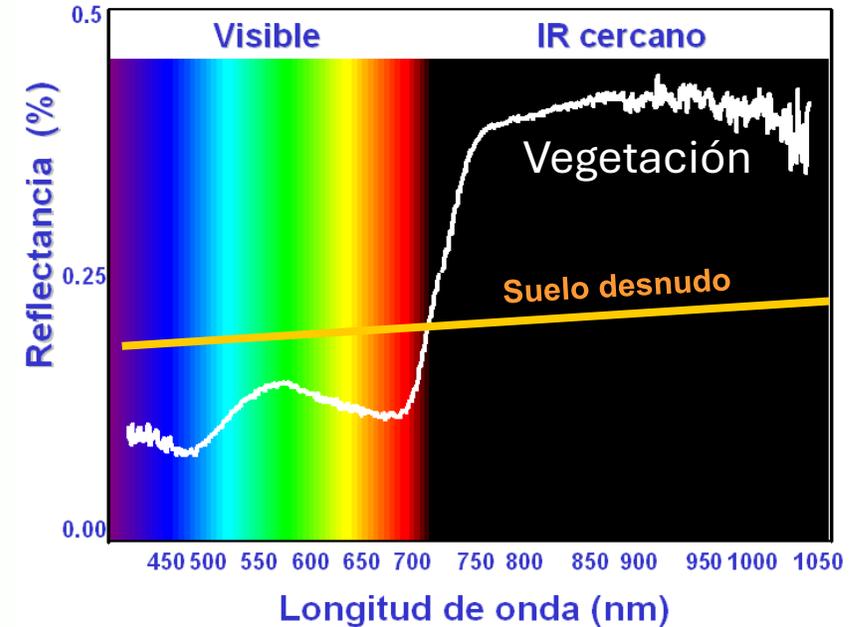
15/10/2024 - 30/10/2024

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
NACIONAL

Reflectancias típicas de la vegetación y el suelo



$$NDVI = \frac{IR - VIS}{IR + VIS}$$

Imagen realizada a partir del producto MOD13A1 de la NASA con una combinación de los datos del canal visible y del infrarrojo cercano del instrumento MODIS portado por los satélites Terra y Aqua.

Productos derivados / Temperatura del agua superficial del mar

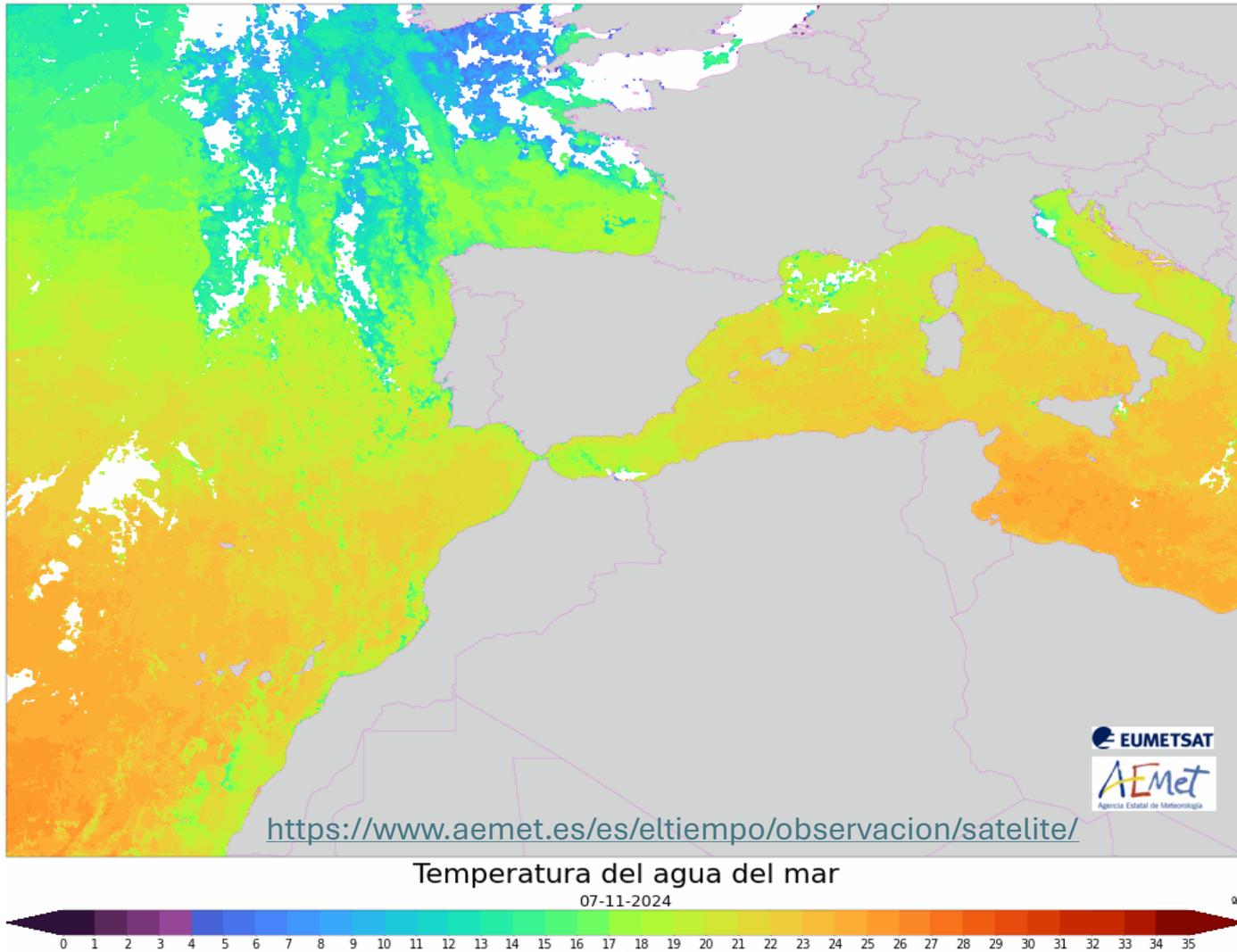


Imagen generada en base al producto "Global Metop Sea Surface Temperature" elaborado por el OSI SAF de EUMETSAT (<https://osi-saf.eumetsat.int/products/osi-201-b>)

Columnas troposféricas de dióxido de nitrógeno (NO₂)

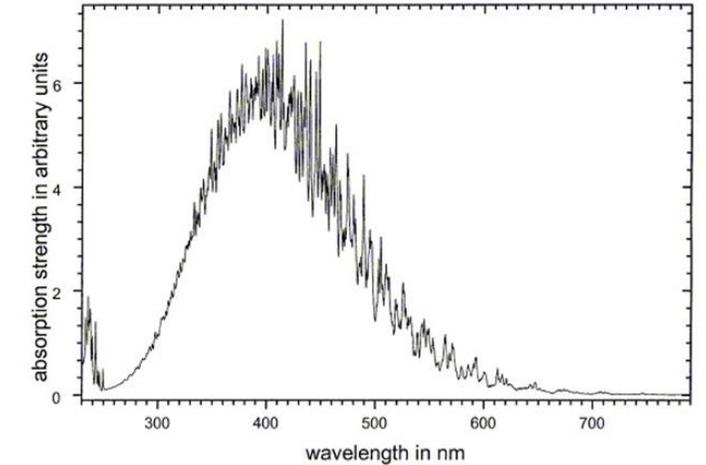
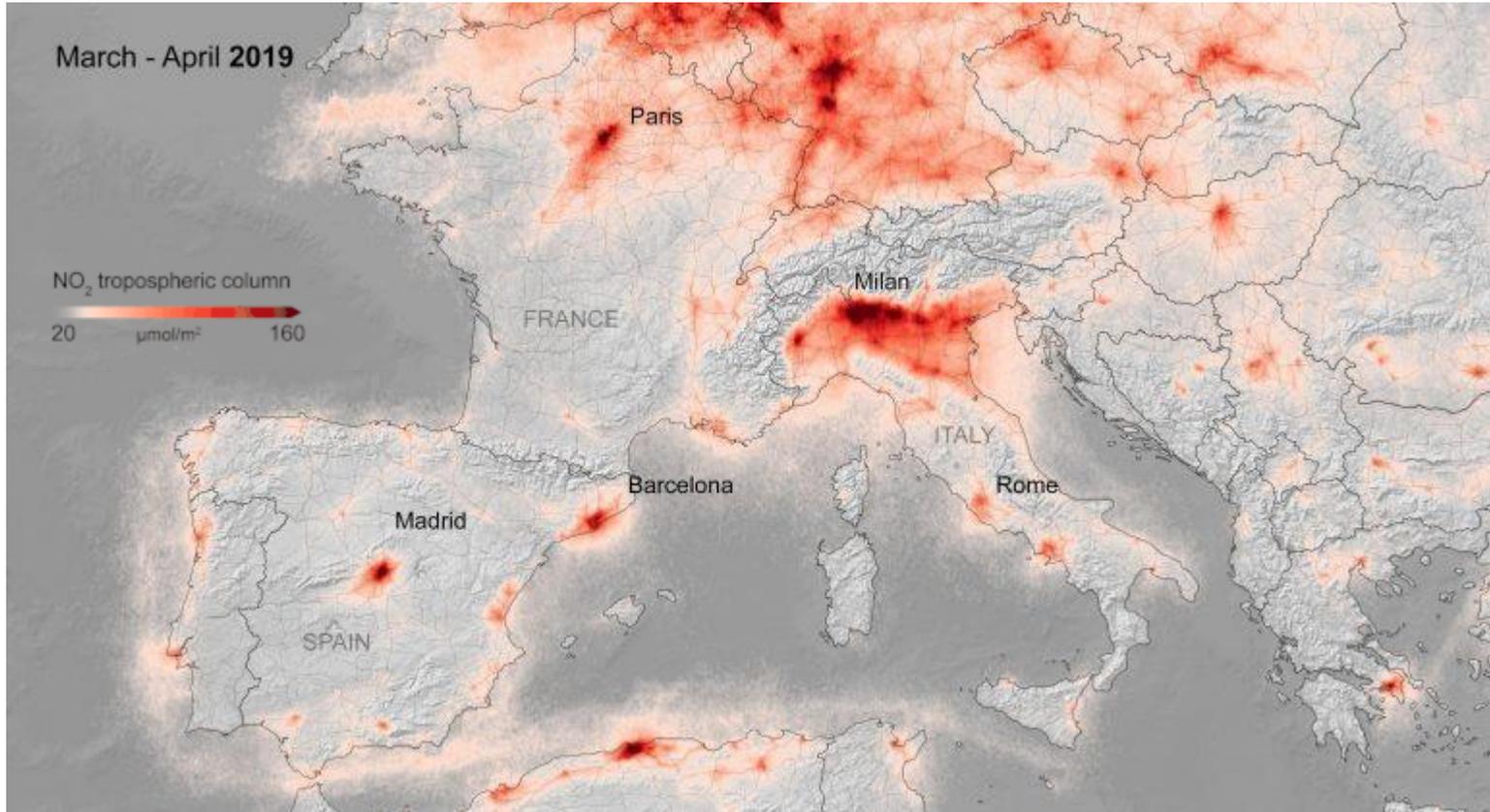
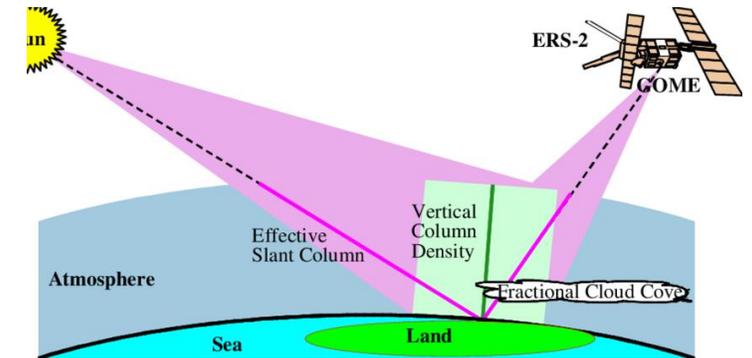


Fig. 1. Relative NO₂ spectrum at 293 K measured by GOME FM between 231–794 nm. The spectral resolution is 0.2 nm at wavelengths below and 0.3 nm above 400 nm.



Procedimiento:

- Un sensor satelital (ej. GOME, SCIAMACHY, OMI, TROPOMI) mide irradiancias en la región 425-450 nm.
- El algoritmo DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) determina una columna de NO₂ a lo largo de un camino inclinado (slant column).
- Conversión a una columna vertical teniendo en cuenta las propiedades de la atmósfera (Air Mass Factors, AMFs).

Columnas troposféricas de dióxido de nitrógeno (NO₂)

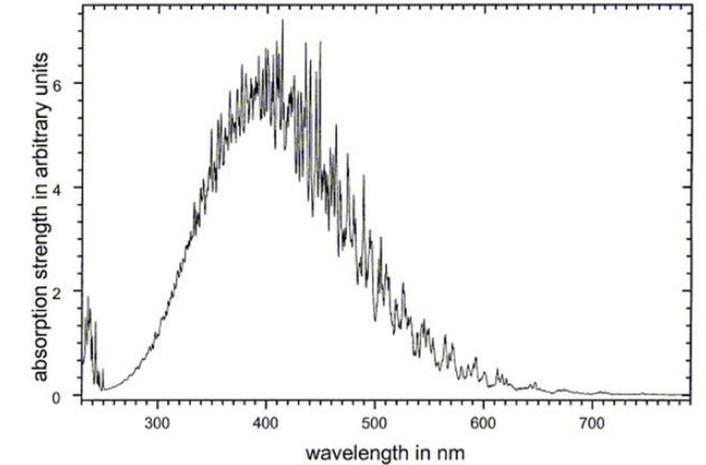
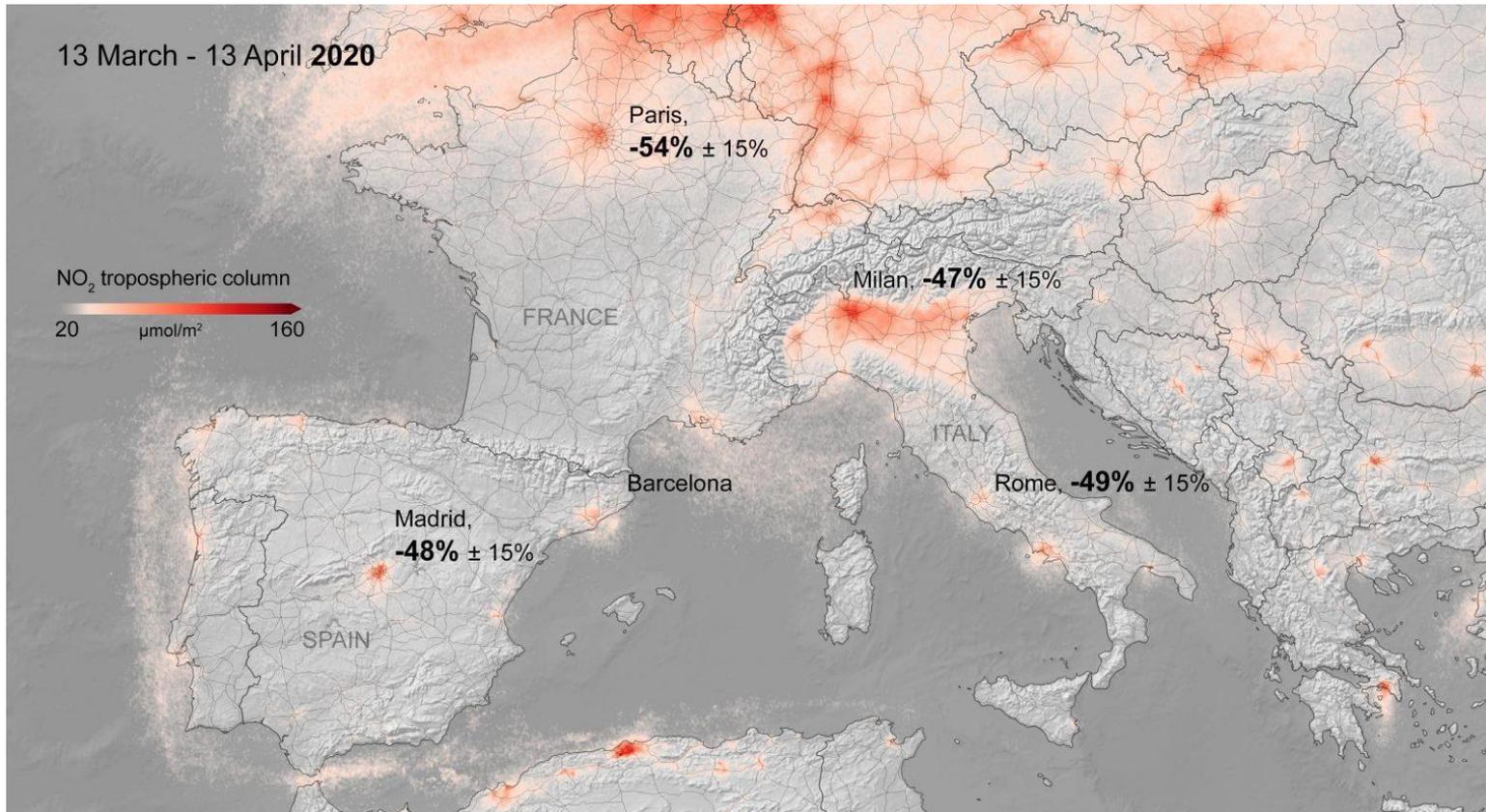
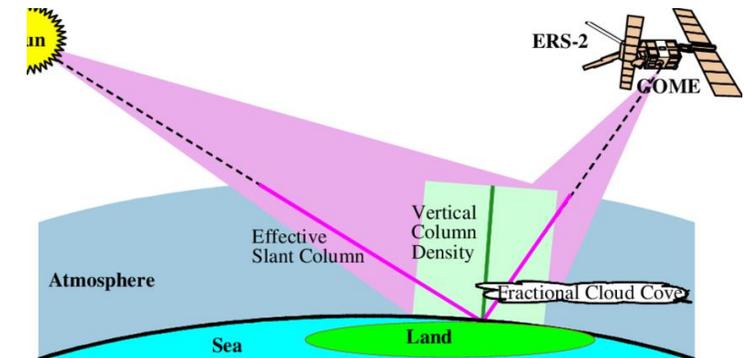
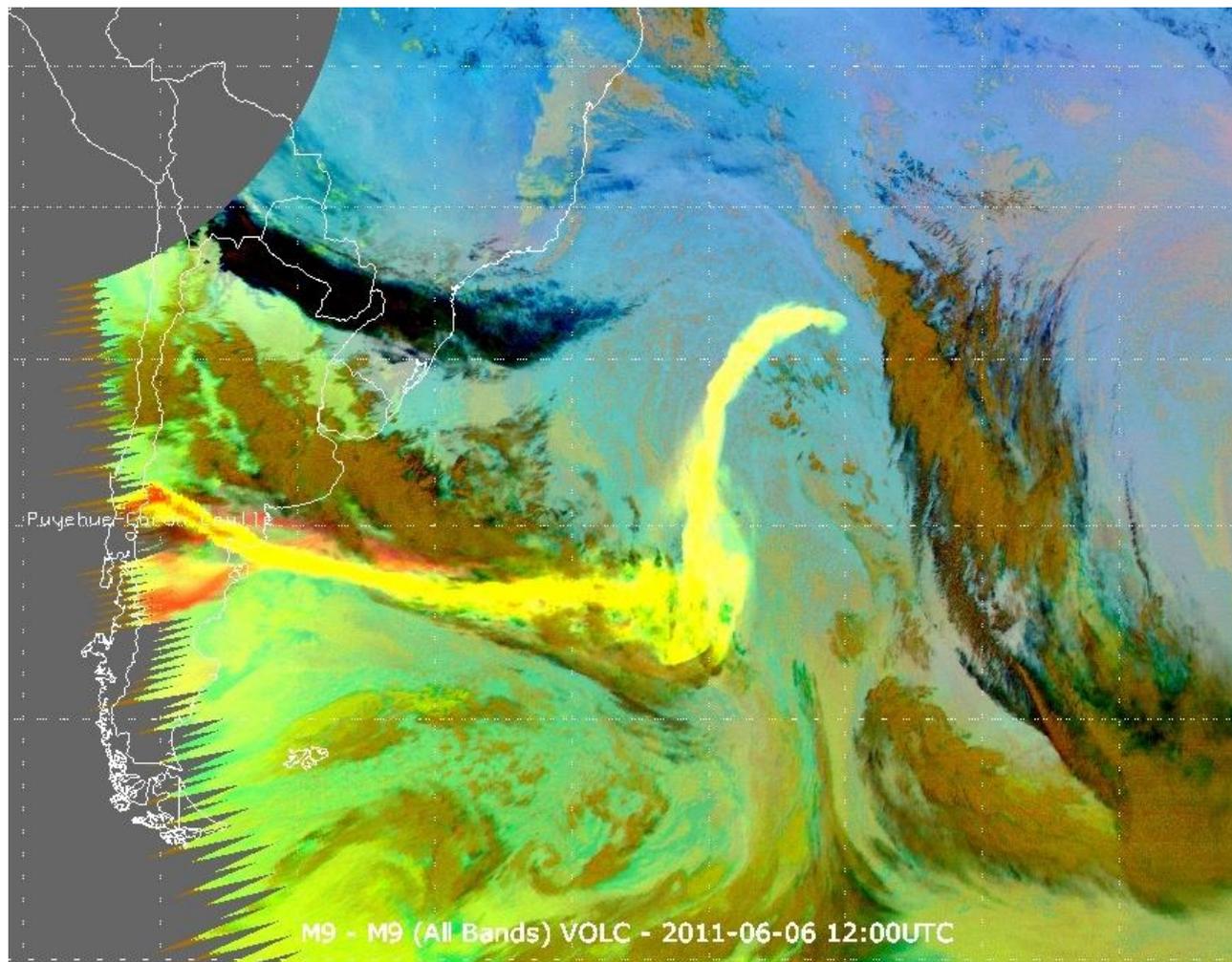


Fig. 1. Relative NO₂ spectrum at 293 K measured by GOME FM between 231–794 nm. The spectral resolution is 0.2 nm at wavelengths below and 0.3 nm above 400 nm.



El confinamiento durante la primavera de 2020 debido a la pandemia COVID-19 causó fuertes reducciones de las emisiones de contaminantes → Disminución de las columnas de NO₂

Erupción volcánica: Transporte de ceniza y dióxido de azufre (SO₂)

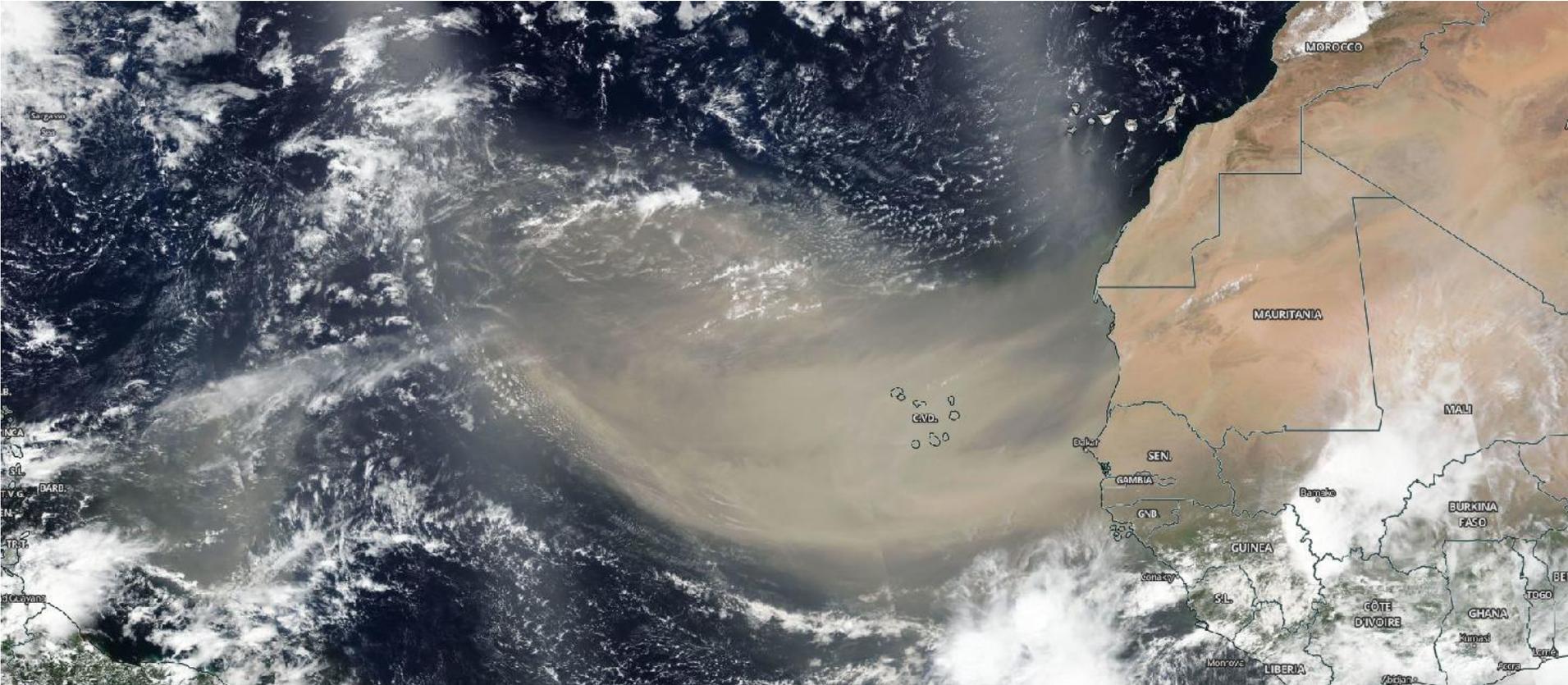


Ash RGB product

1	Cloud free land (Shades of blue or pink depending on the temperature and water vapour content)
2	SO ₂ gas plume (Shades of bright green depending on the concentration)
3	Thin volcanic ash (Shades of red depending on the concentration)
4	Mixed ash and SO ₂ gas (Shades of yellow depending on the concentrations)
5	Water cloud (Shades of greyish tan)
6	Thick ice cloud or Thick volcanic ash cloud (Shades of brown)
7	Thin ice cloud (Shades of dark blue depending on the transparency)

Nube de ceniza (rojo) y penachos mixtos de ceniza y SO₂ (amarillo) serpenteando sobre el Atlántico Sur. Estas nubes fueron expulsadas por el complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle en Chile.

Transporte de polvo sahariano



Máscara de nubes (Cloud Mask)

