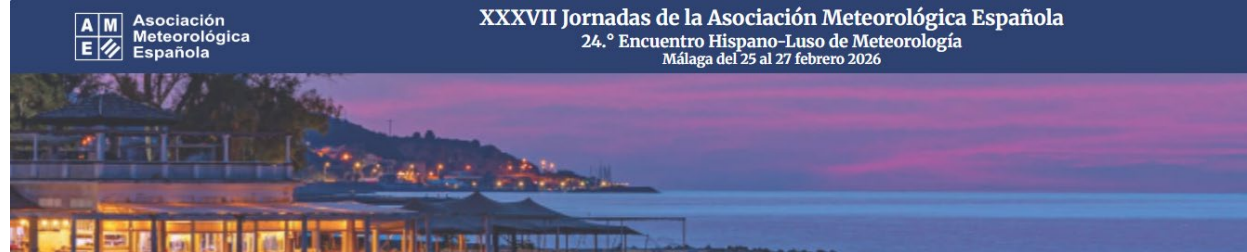


Aprendizaje profundo aplicado a imágenes radar para nowcasting de precipitación

P. Oria, I. Perez del Notario, A. del Rey, H. Bustince

Indice



Introducción al NWC de precipitación: QPE, QPF, imágenes radar, NWP vs Radar

DL aplicado a NWC

Fractional Skill Score

Técnicas para construir un ensemble

Probability-matched mean

Bases para un buen NWC de precipitación



Actual

Estimación cuantitativa de precipitación (QPE)

Severe Weather

Precipitación fuerte o torrencial, granizo, rayos, rachas de viento

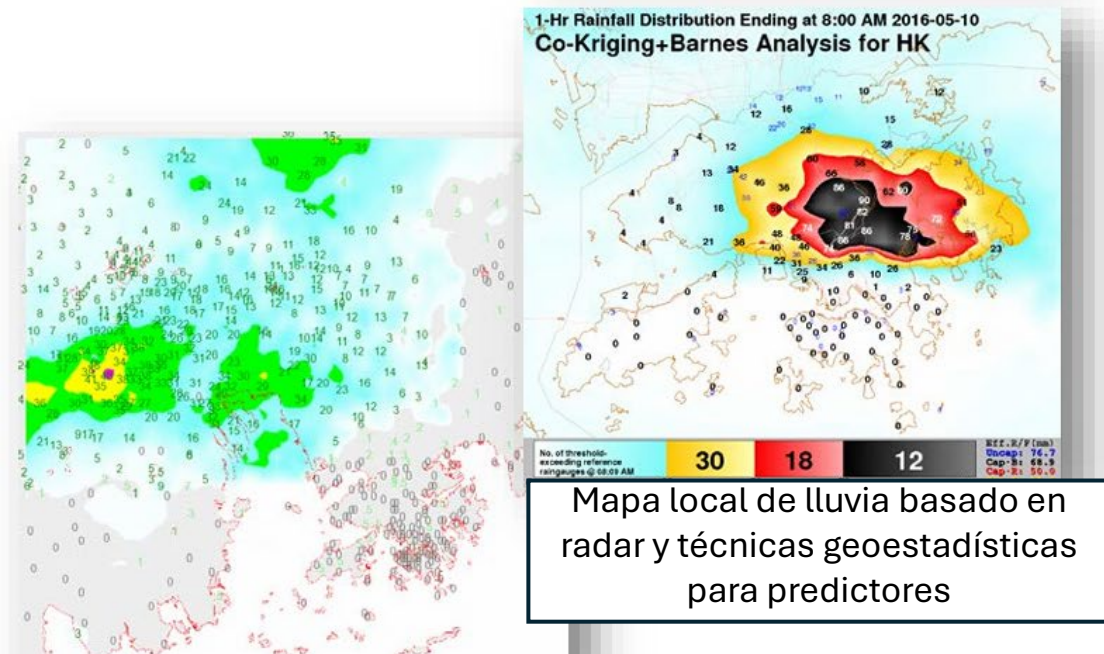
Forecast

Predicción cuantitativa de precipitación (QPF)

Services

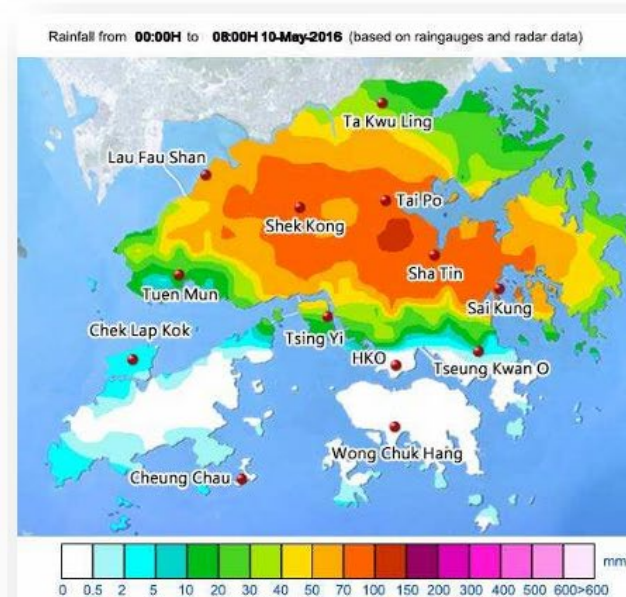
Pronósticos y avisos orientados a la población/infraestructuras

Ejemplos “clásicos” de QPE según el usuario



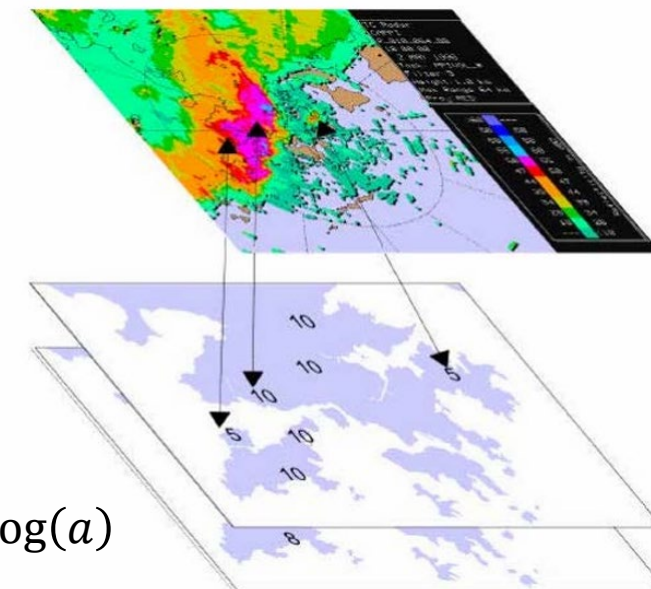
Mapa local de lluvia basado en radar y técnicas geoestadísticas para predictores

Mapa regional de lluvia georreferenciado (NWP / GIS) para predictores



Mapa local de lluvia para el público

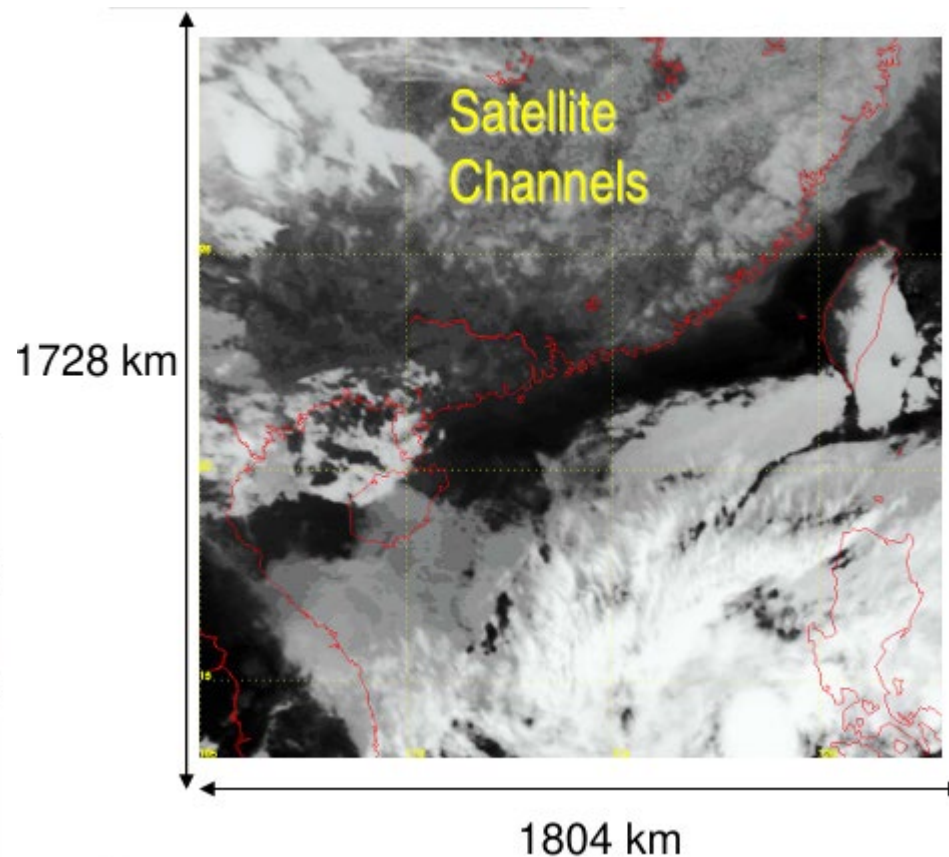
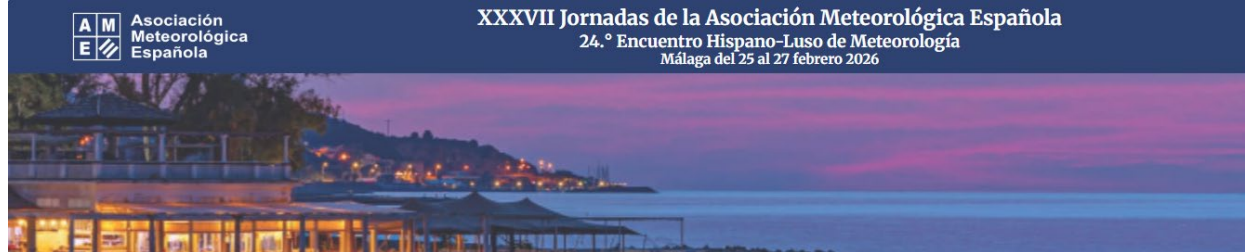
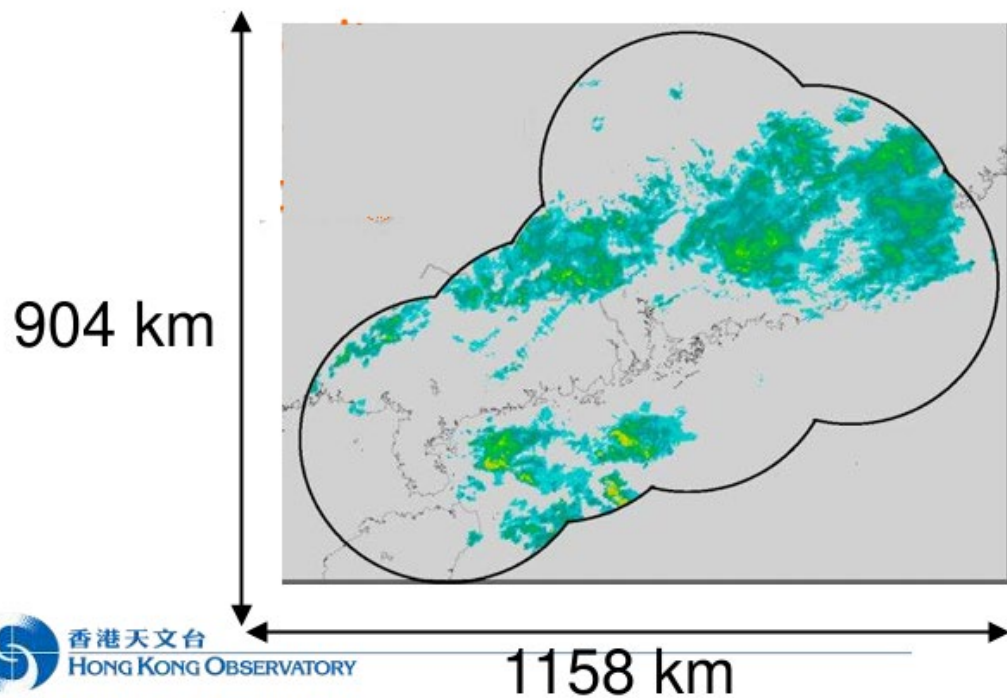
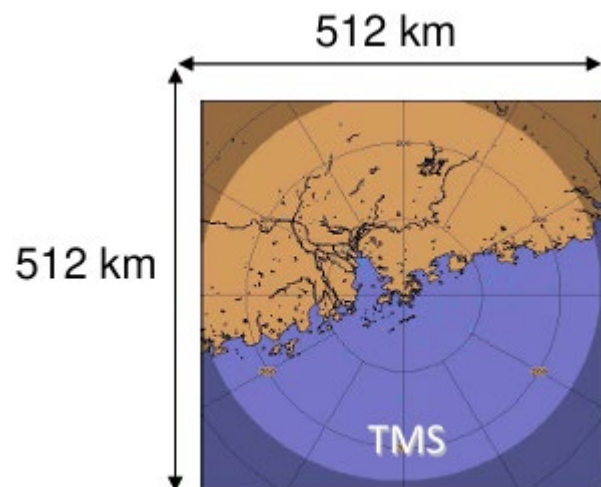
Diagrama esquemático que muestra la calibración de la reflectividad del radar utilizando mediciones en tiempo real de pluviómetros

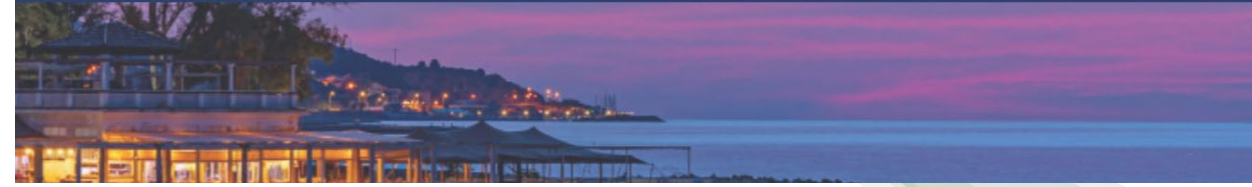


$$Z = aR^b$$

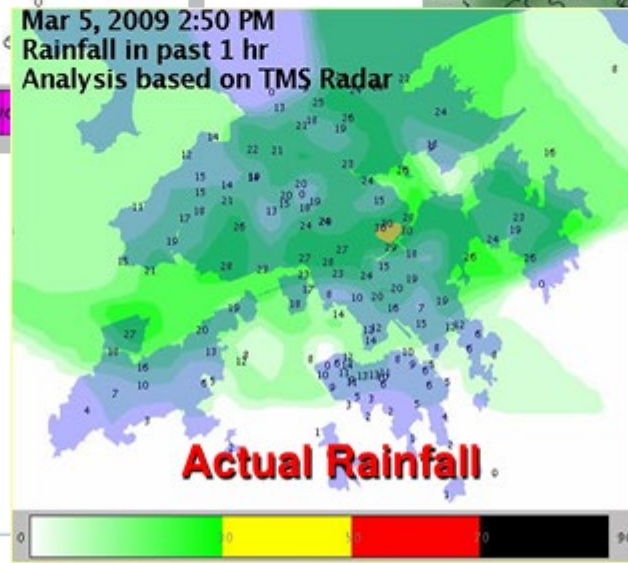
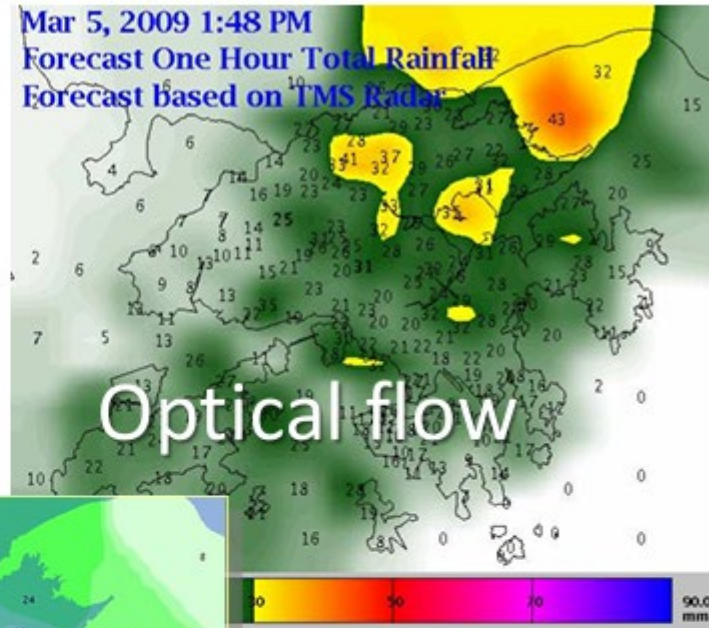
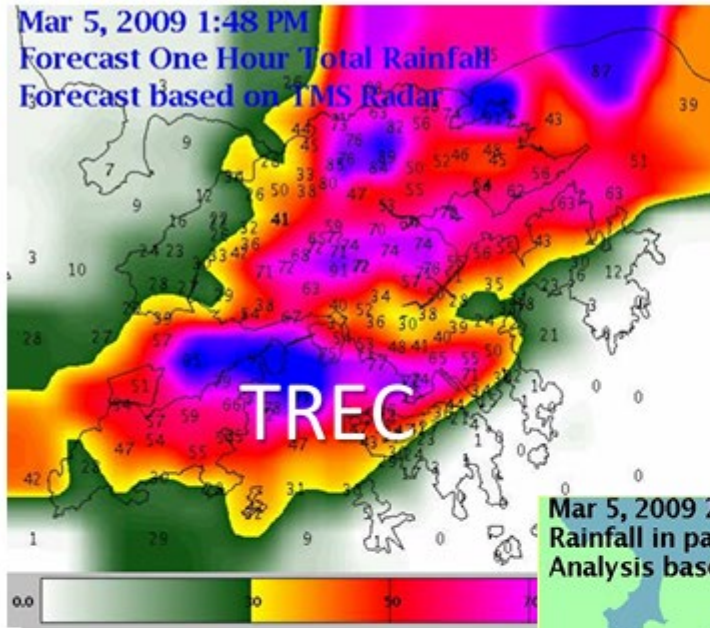
$$dBZ_i = b \, dBG_i + 10\log(a)$$

QPE multisensor

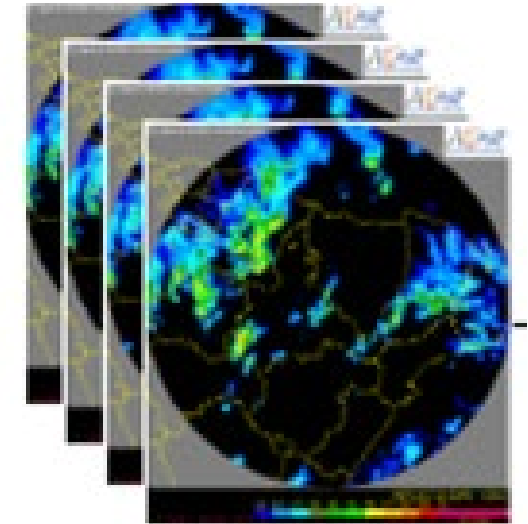




Ejemplos “clásicos” de QPF



Input sequence:
Last M images



NWP vs RADAR

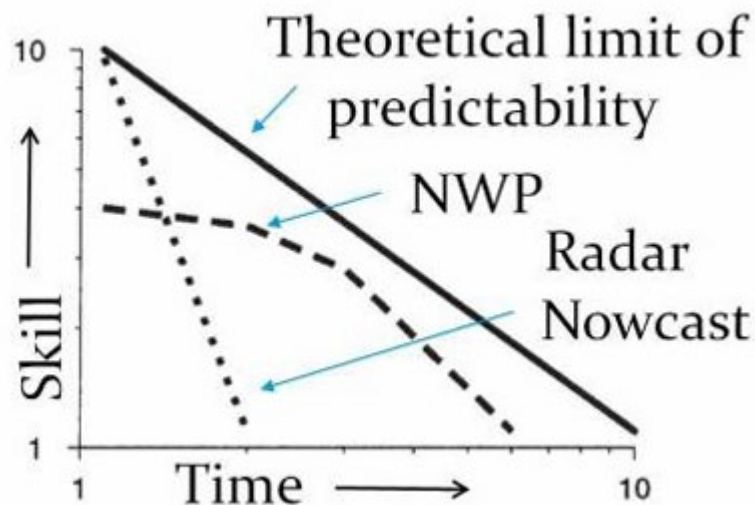


Basado en radar

- Básicamente procesamiento de imágenes: basado en correlación, *optical flow*, *Convolutional LSTM*.
- Bueno para las primeras horas.
- La precisión disminuye rápidamente después.

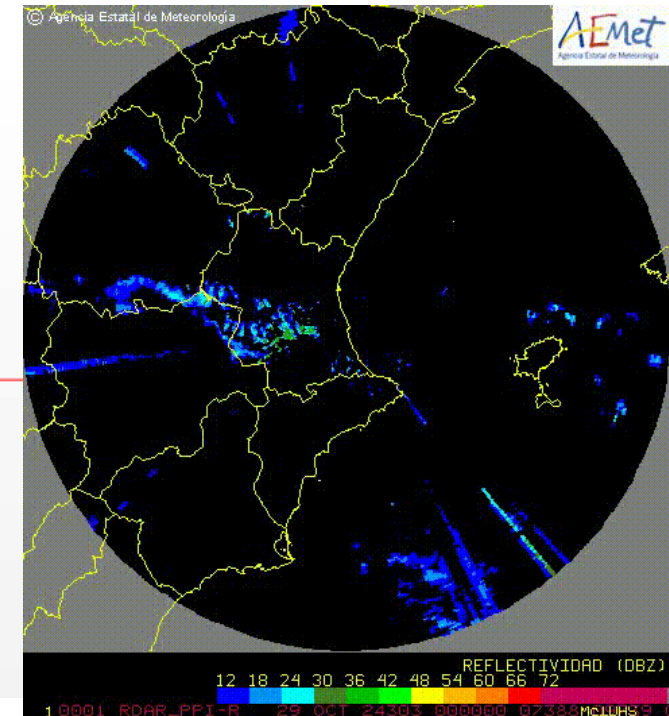
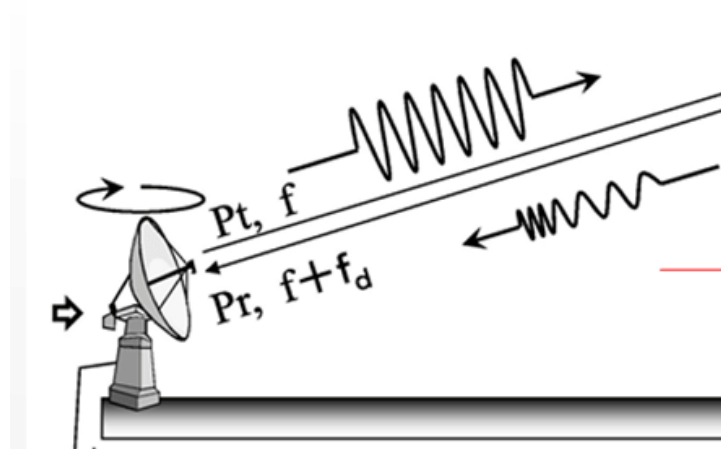
Basado en NWP (Predicción Numérica del Tiempo)

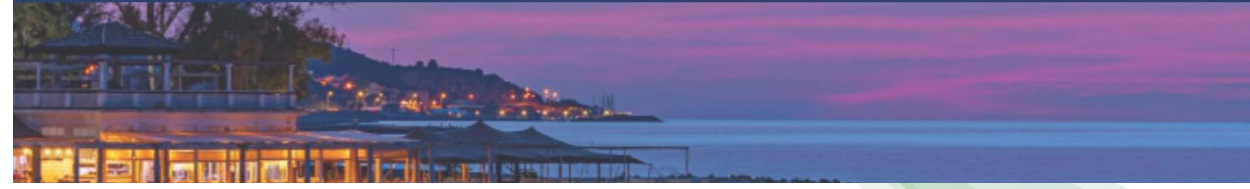
- Basado en las Ecuaciones Primitivas.
- No es tan preciso en las primeras horas debido al problema de *spin-up*.
- Más preciso que el enfoque basado en radar en horas posteriores



Imágenes Radar

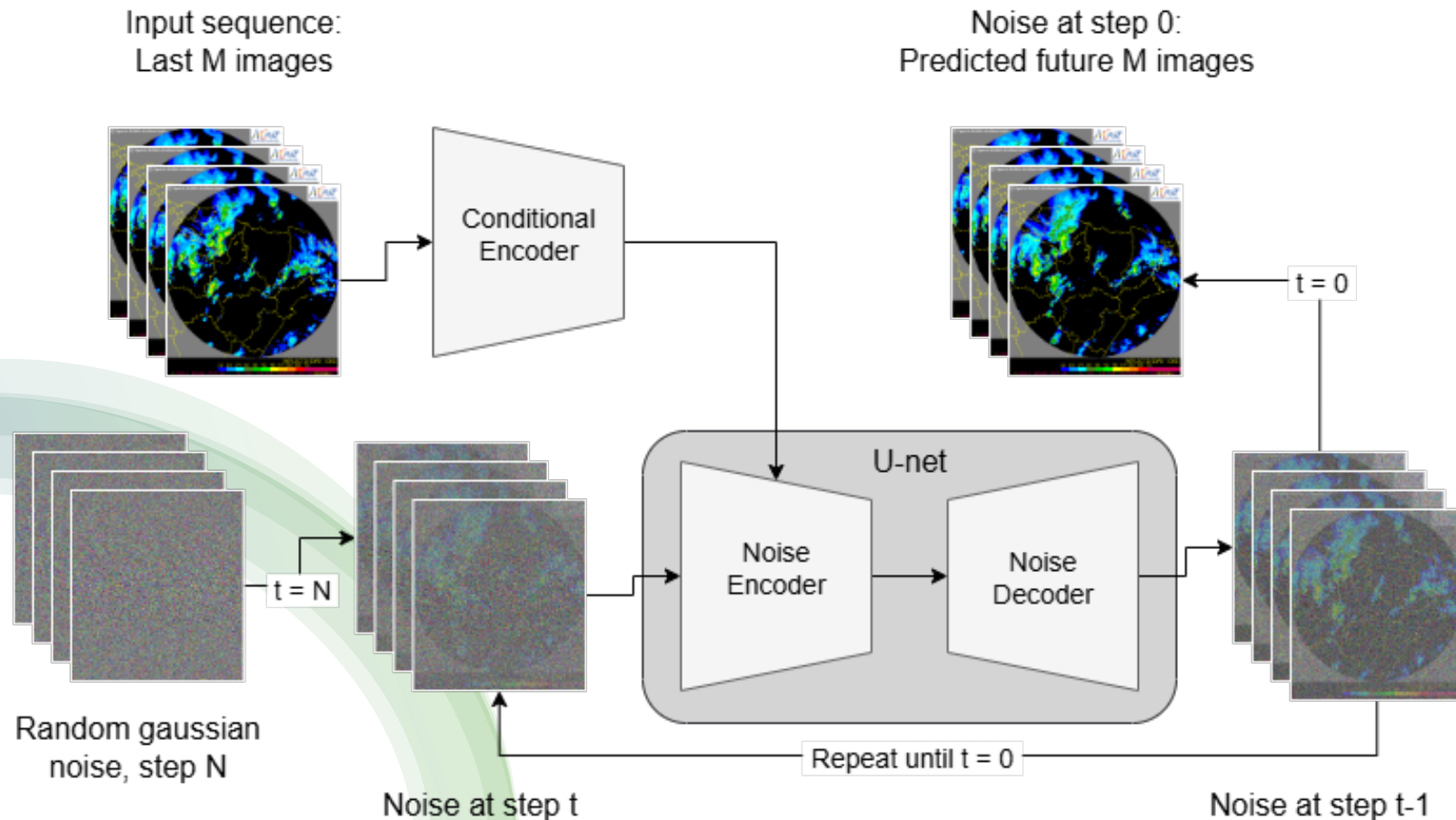
Sensores basados en teledetección terrestre que estiman la cantidad de lluvia que está cayendo en un área circular.





Radar-based NWC con Deep Learning

Probabilistic diffusion model



Otras técnicas empleadas:

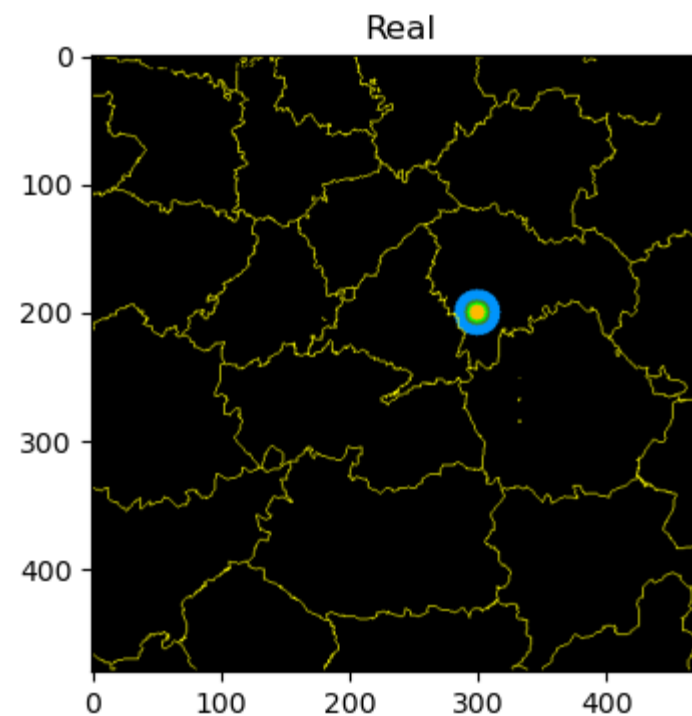
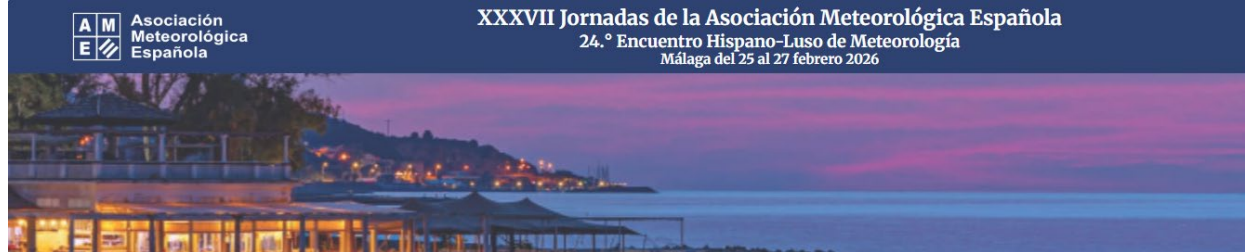
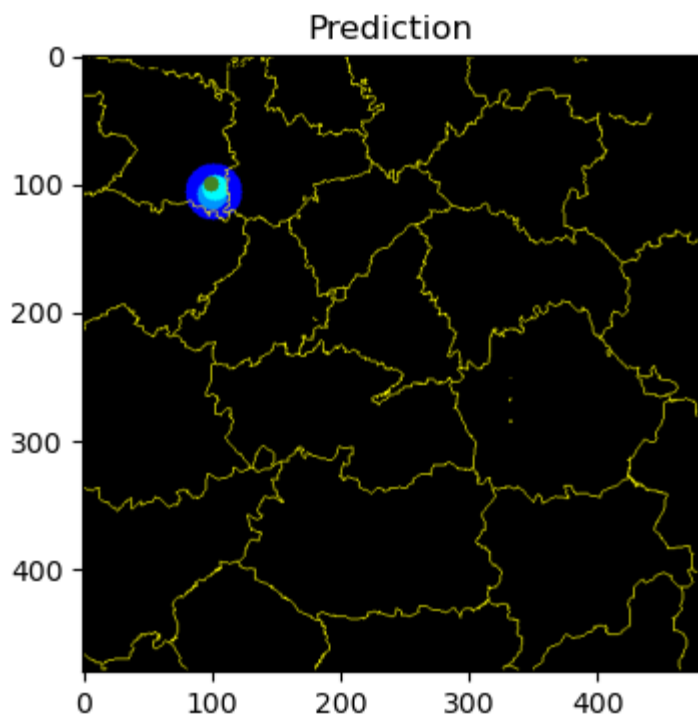
- CNN
- GAN
- VAE

¿Qué hace una predicción mejor que otra?

Ejemplo de mala predicción:

Localización: Muy lejos

Intensidad: Muy baja

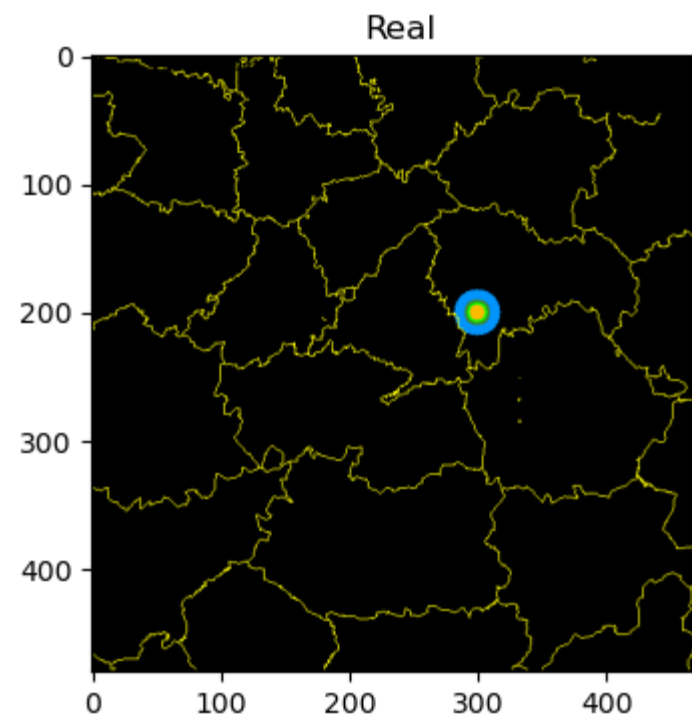
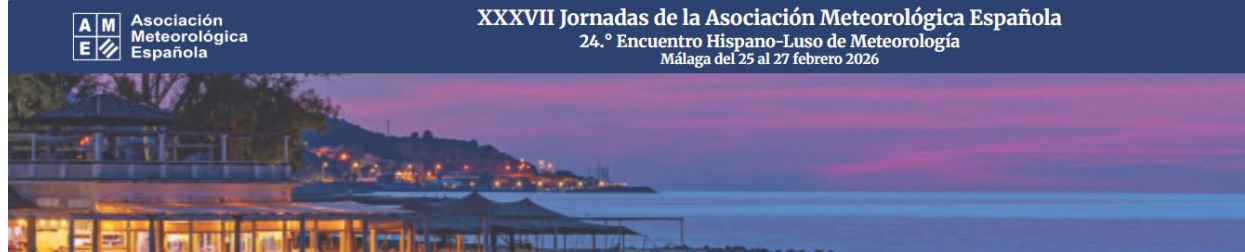
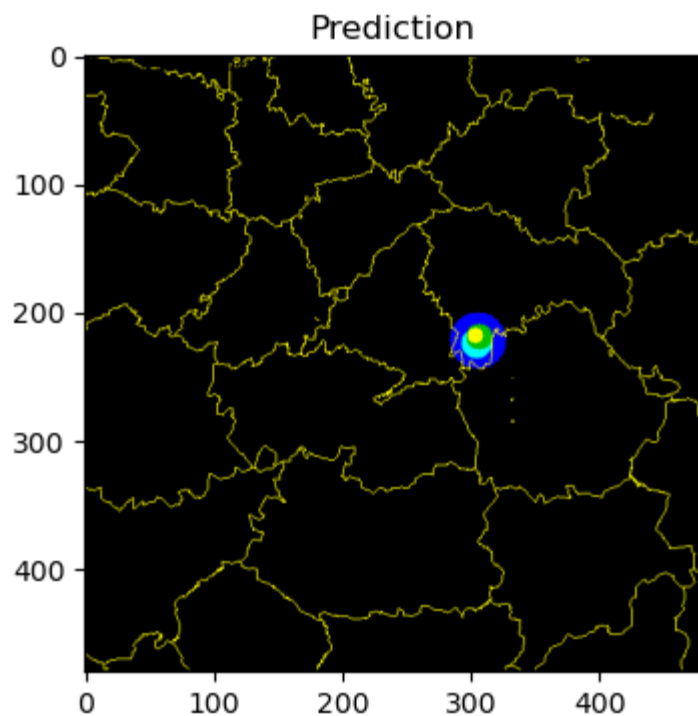


¿Qué hace una predicción mejor que otra?

Ejemplo de buena predicción:

Localización: No exacta, pero próxima

Intensidad: Máximo de intensidad simular





Problema con métrica tradicional

Mean Squared Error (MSE) o Mean Absolute Error (MAE)

Comparan diferentes imágenes pixel por pixel

No tienen en cuenta la proximidad espacial.

MAE of

Forecast		
0	1	0
0	0	0
0	0	0

and

Real		
0	0	1
0	0	0
0	0	0

$= 1 + 1 = 2$

El error es alto a pesar de que los pixeles están muy cerca

Fraction Skill Score

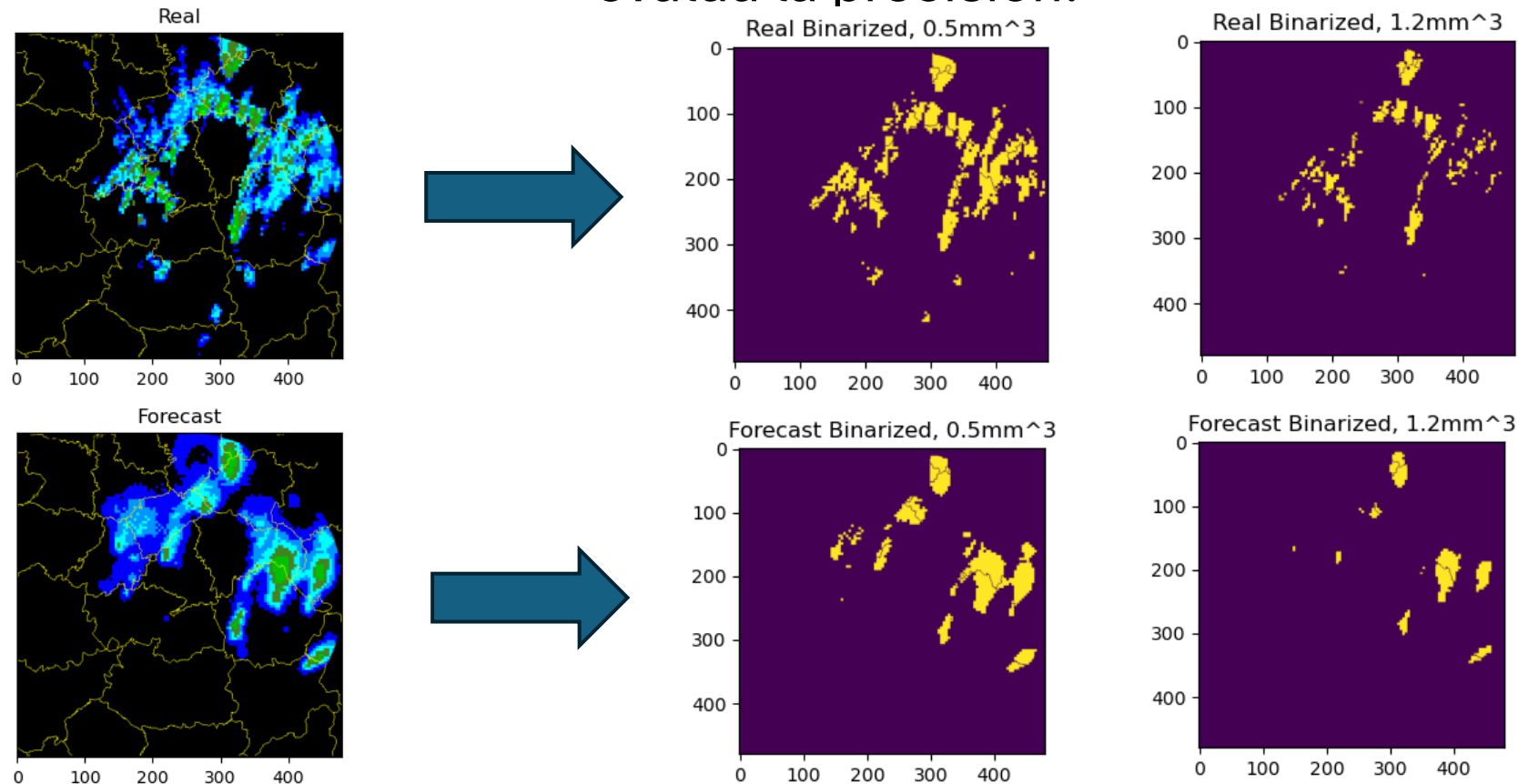
Métrica de evaluación “State of the art” en meteorología.

Mide proximidad espacial entre el forecast y el real.

Fraction Skill Score

Paso 1: Binarizar las imágenes de predicción y las imágenes reales utilizando un umbral de intensidad.

El umbral de intensidad es el nivel de intensidad a partir del cual el modelo evalúa la precisión.





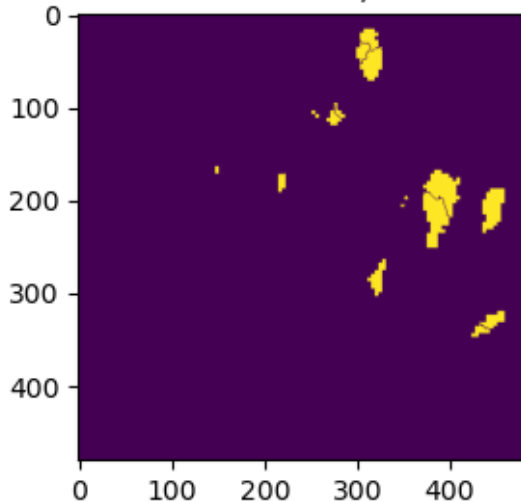
Fraction Skill Score

Paso 2: Aplicar un filtro uniforme para difuminar los bordes y medir la proximidad espacial a las celdas de lluvia.

El tamaño de la ventana del filtro lo define el usuario; tamaños mayores se traducen en un mayor alcance espacial.

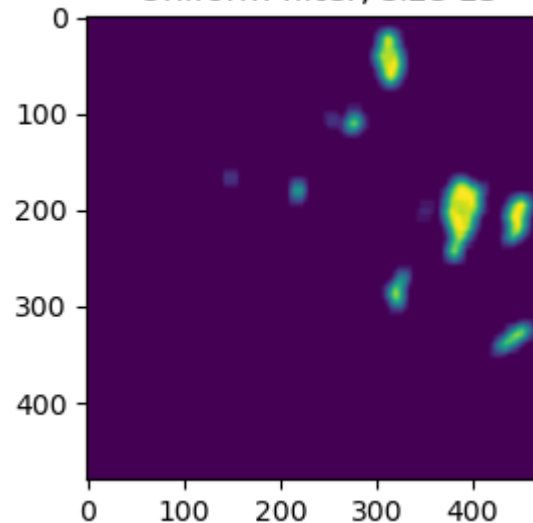
Crisp borders

Forecast Binarized, 1.2mm^3

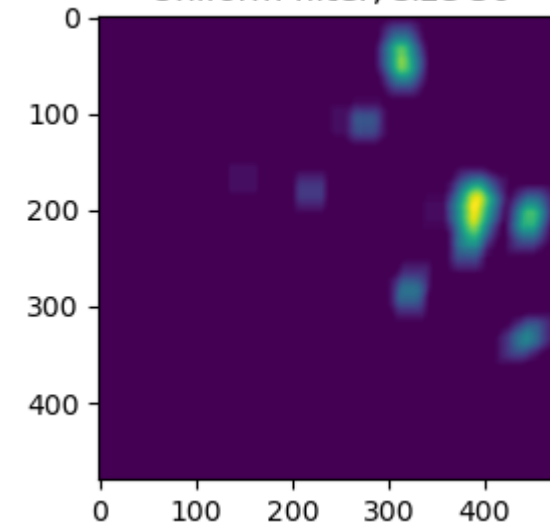


Fuzzy borders

Uniform filter, size 15



Uniform filter, size 30



Fraction Skill Score



Paso 3: Calcular el error cuadrático medio (MSE) entre las imágenes de predicción y observación binarizadas y difuminadas.

La fórmula del FSS (Fractions Skill Score) es:

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i^2 + O_i^2)}, \text{ donde}$$

P_i son los píxeles de la imagen de predicción, binarizados y difuminados.

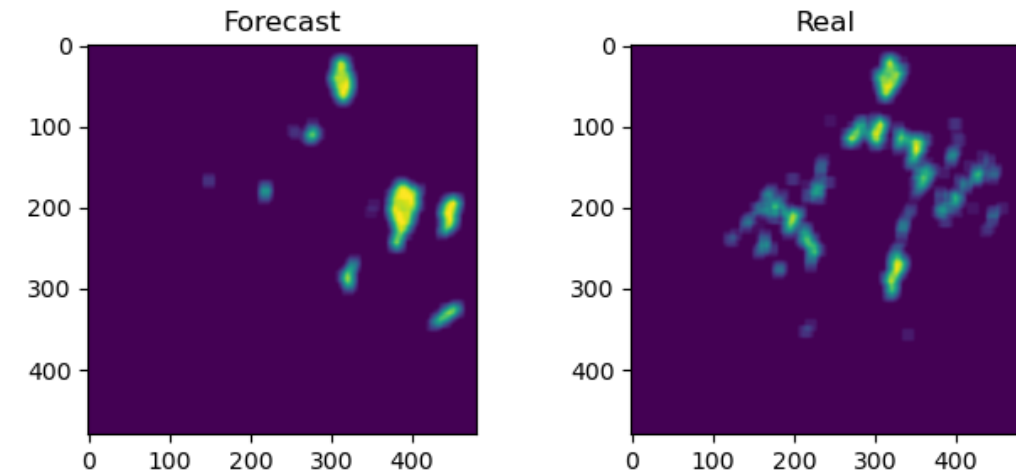
O_i son los píxeles de la imagen real (observación), binarizados y difuminados.

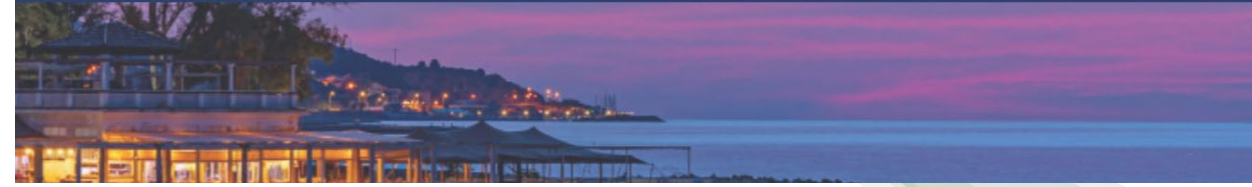
N es el número total de píxeles de la imagen.

Para tener en cuenta múltiples escenarios, evaluamos las predicciones usando el FSS con varios umbrales de intensidad y tamaños de ventana.

Umbrales: [0.2, 0.5, 1.2, 2.7, 6.5, 15.4, 36.5] mm³

Tamaños de ventana: [3, 5, 7, 11, 15] km





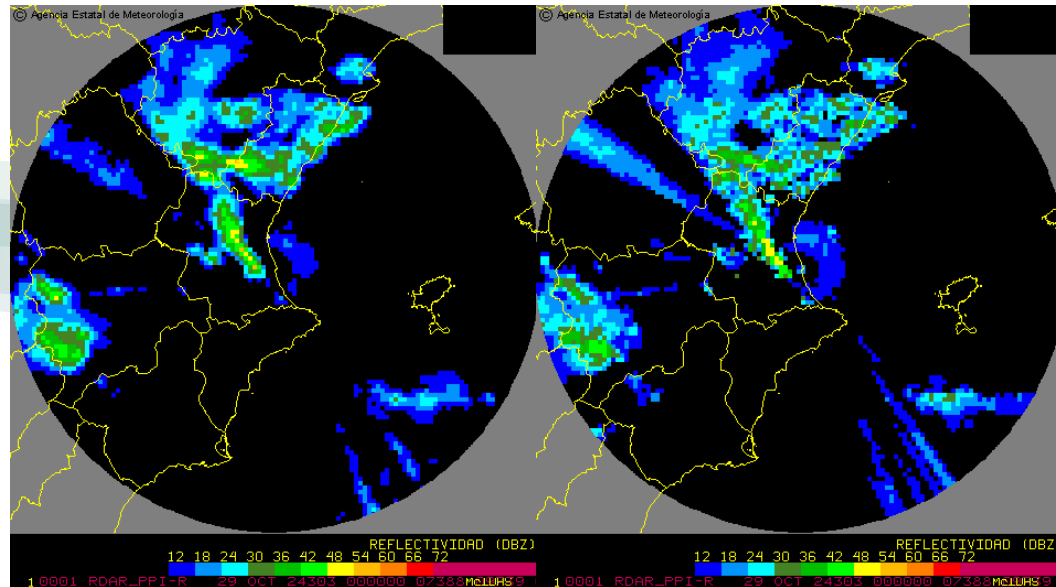
Radar-based forecasts

Predicciones en el rango de 90 minutos con imágenes de radar

Flash flood Valencia 2024

Prediction

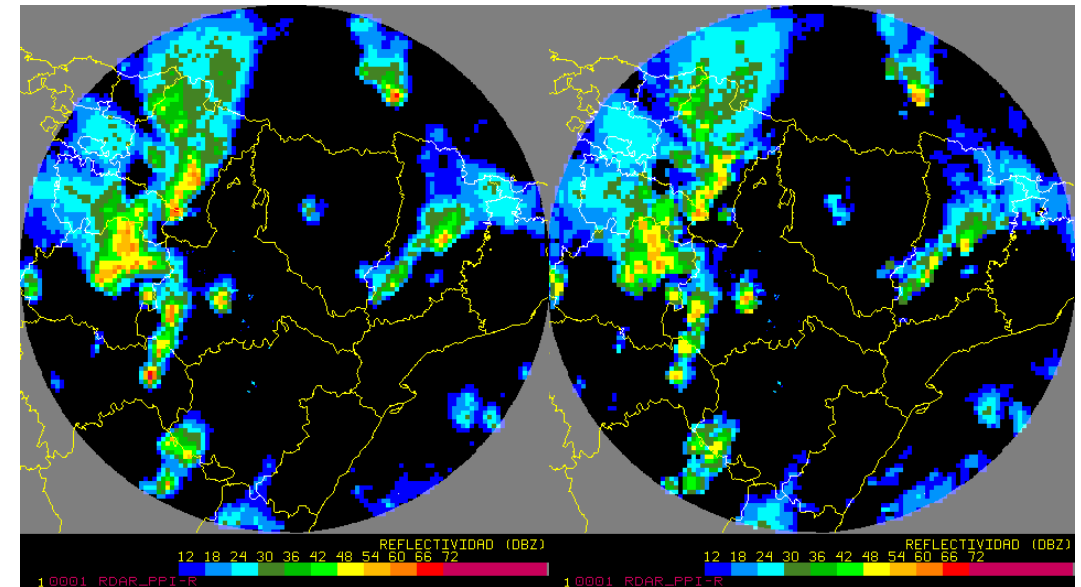
Real

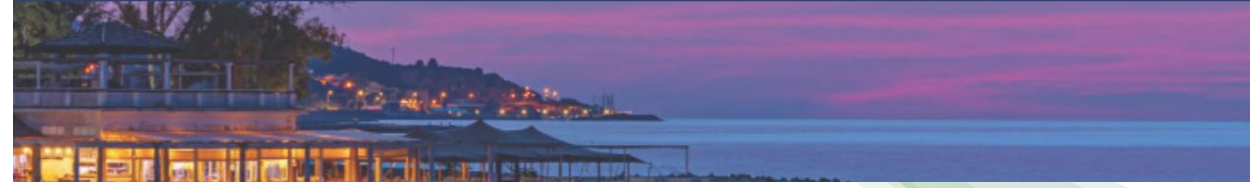


Flash flood Navarre 2019

Prediction

Real





¿Cómo modelizamos la incertidumbre?

Si una predicción no es suficientemente buena...

necesitamos **MAS**

Asociación Meteorológica Española

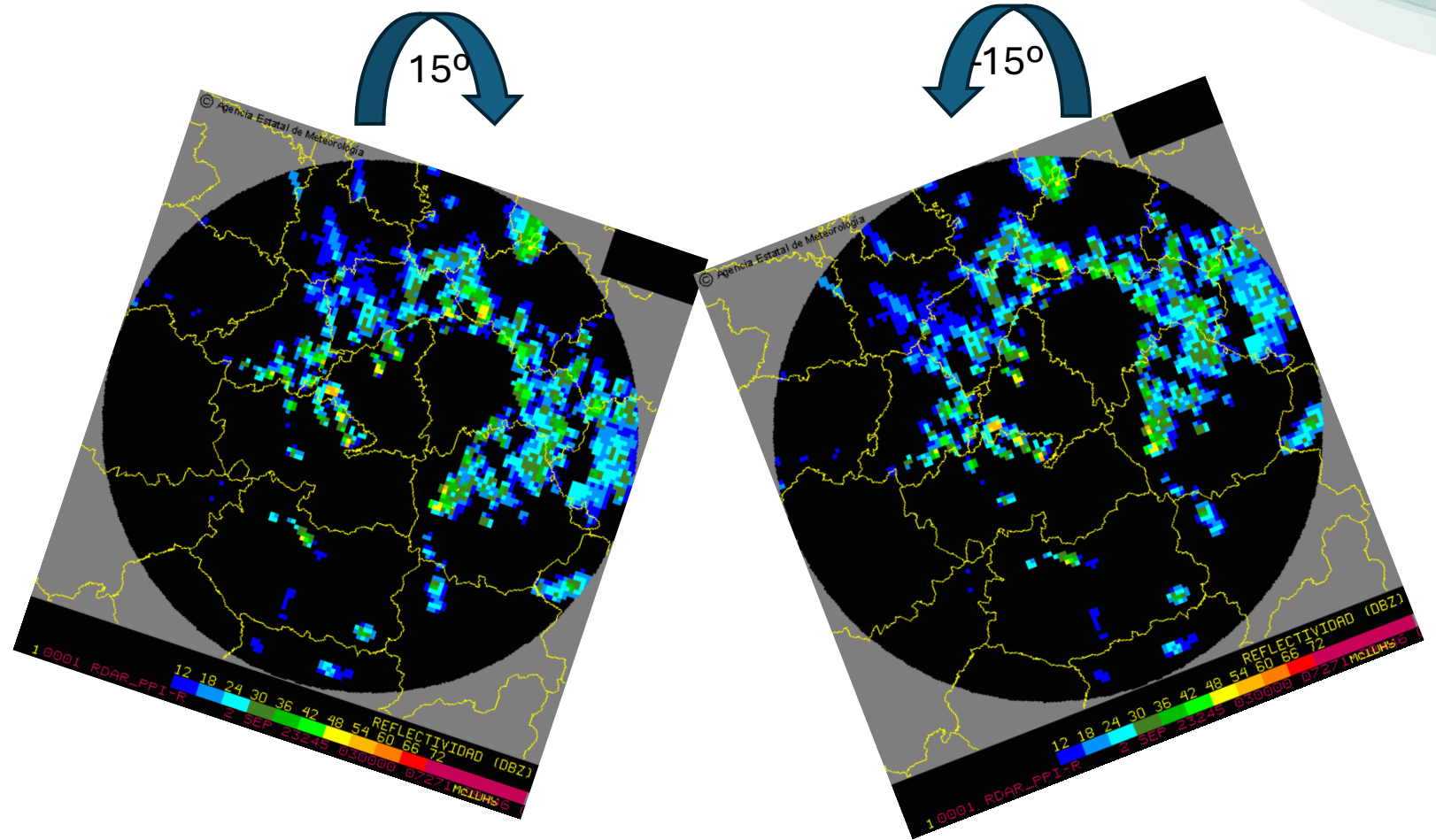
XXXVII Jornadas de la Asociación Meteorológica Española
24.º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología
Málaga del 25 al 27 febrero 2026

© Agencia Estatal de Meteorología

REFLECTIVIDAD (DBZ)

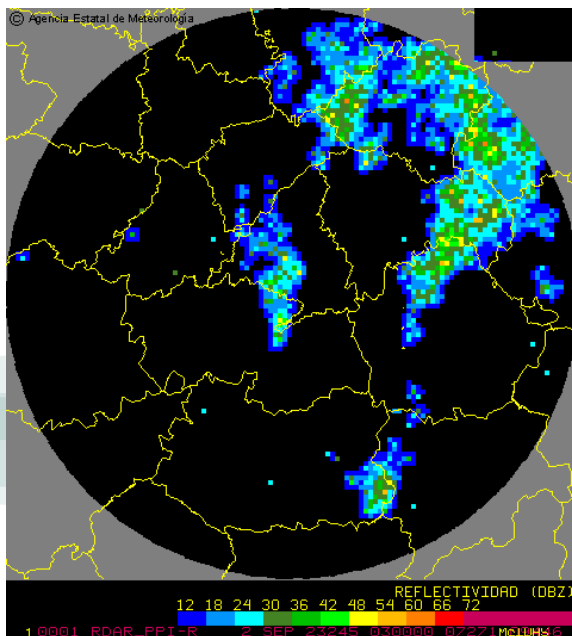
12 18 24 30 36 42 48 54 60 66 72

10001 RDAR_PPI-R 2 SEP 23245 030000 07271MCLUS

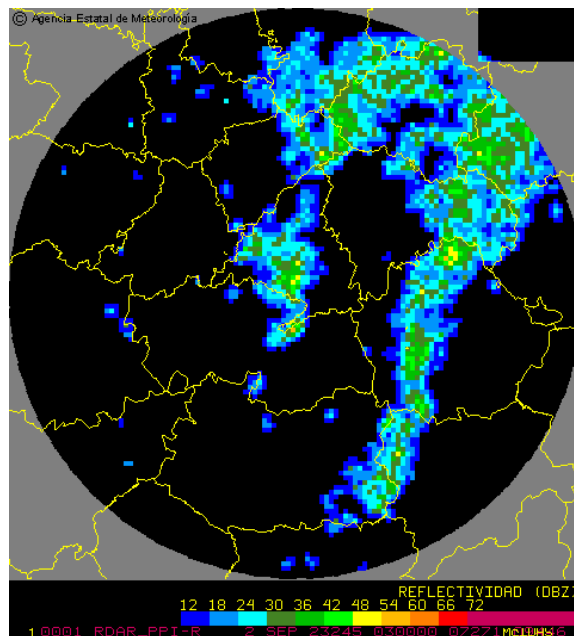


...causa ligeras variaciones en las salidas

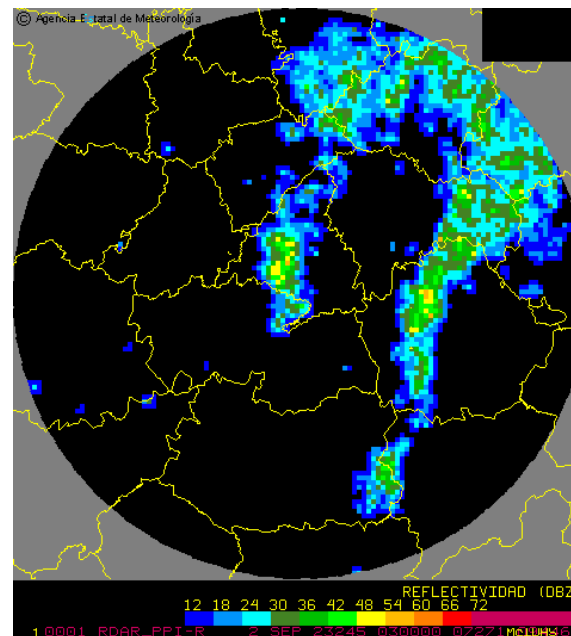
Prediction original



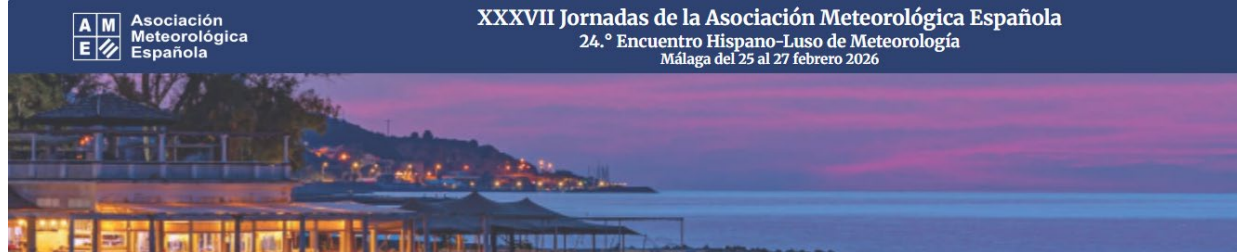
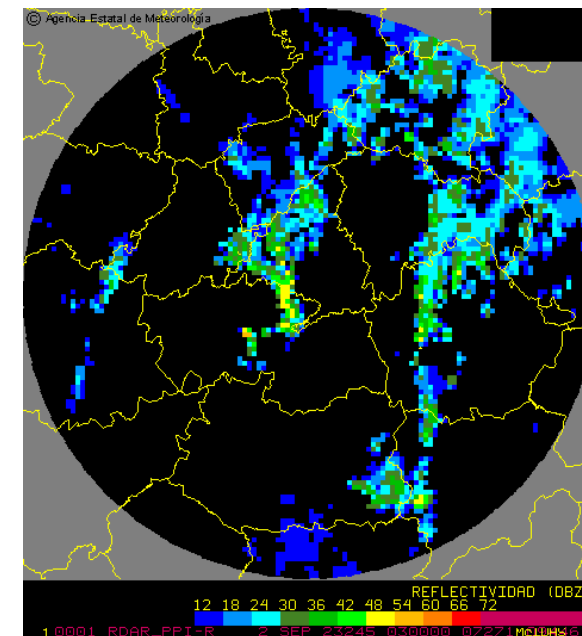
Pred. +15°



Pred. -15°

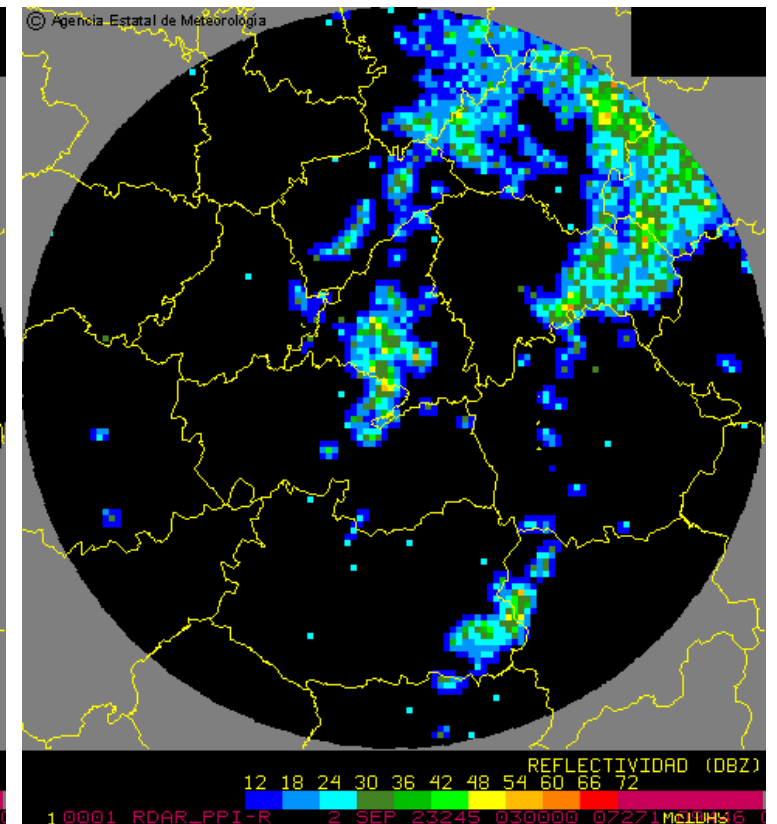
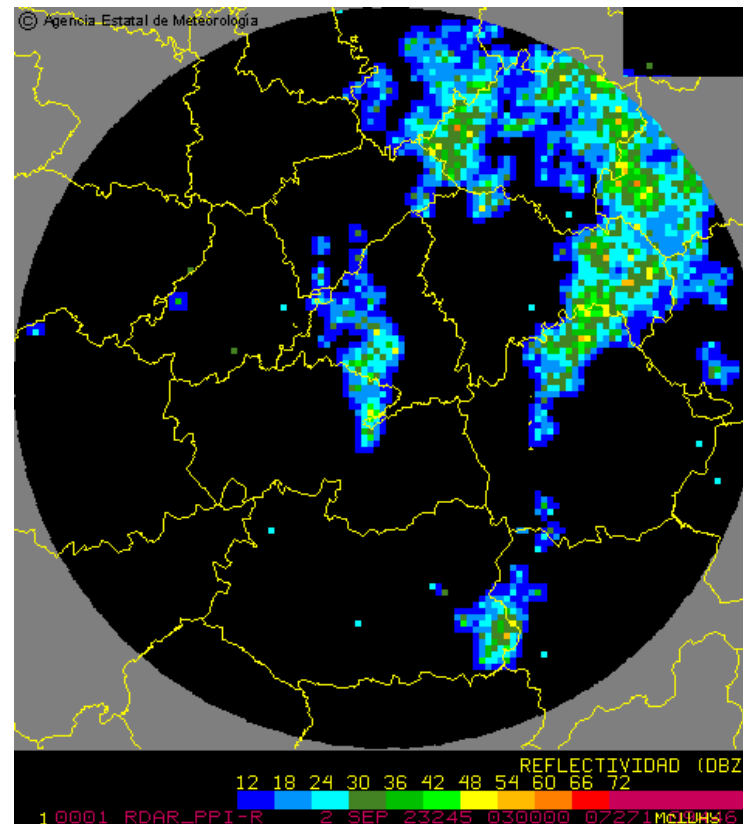
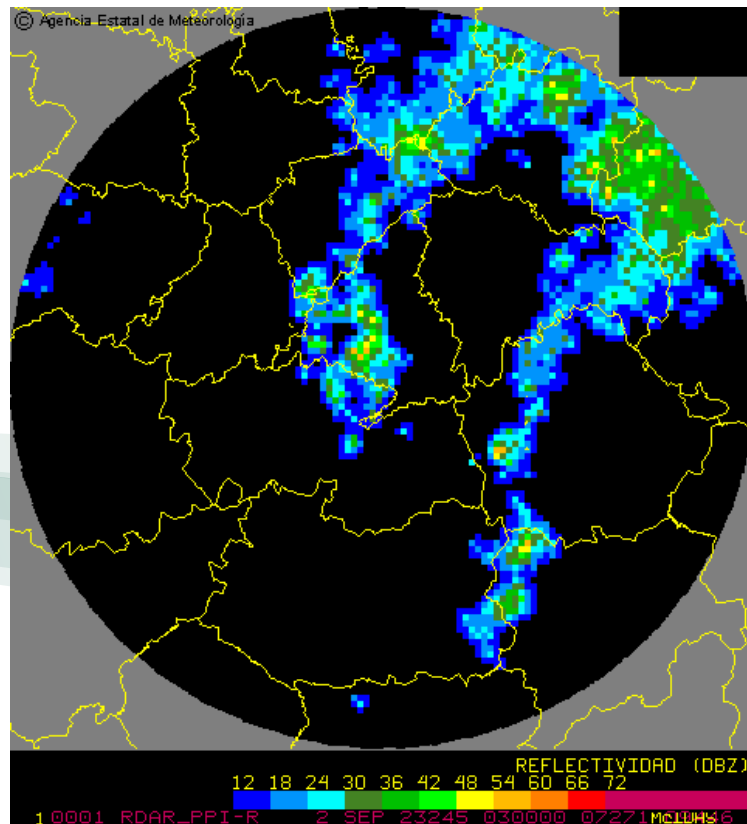


Real

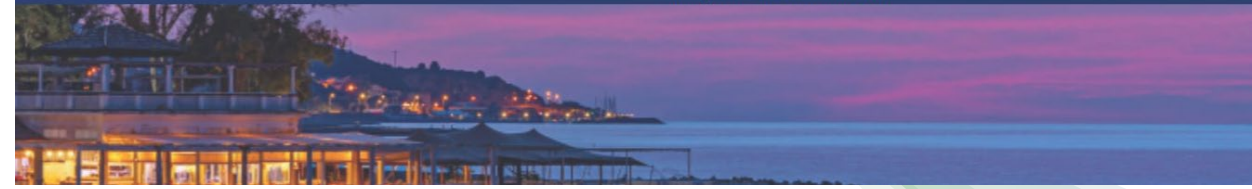


Entrenamos modelos distintos con ligeras variaciones...

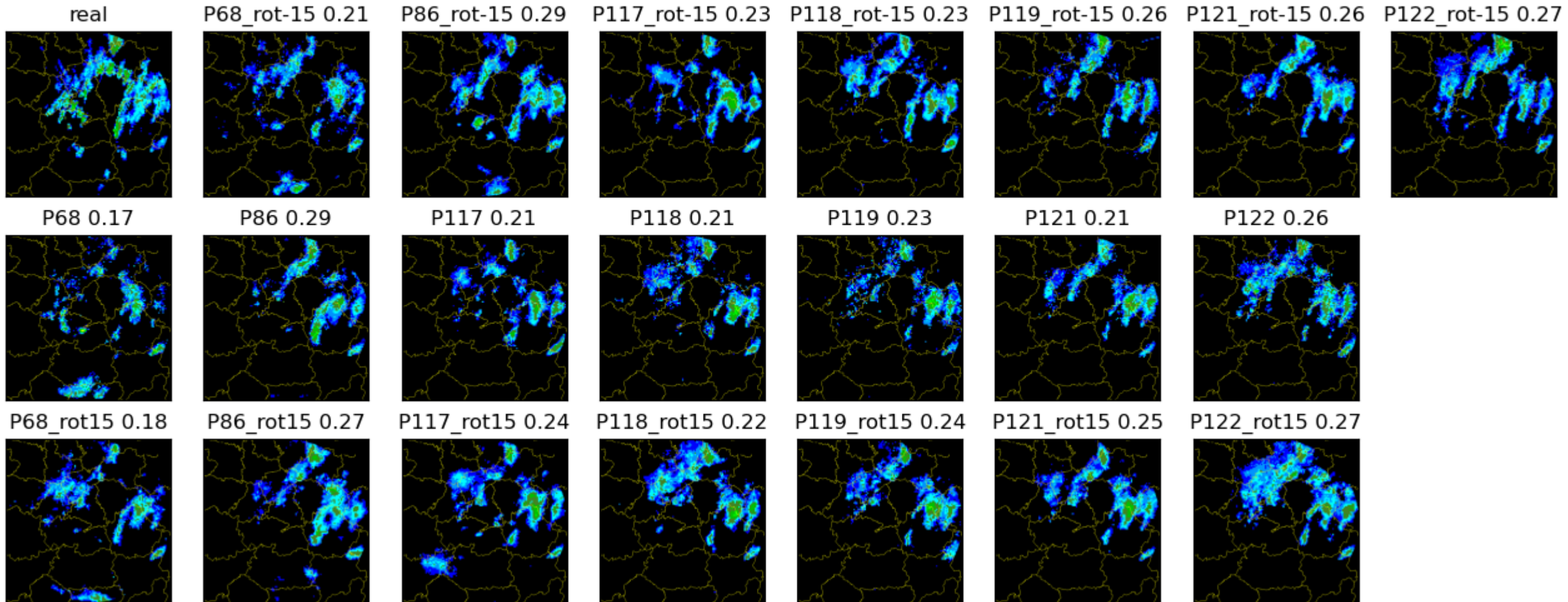
Diferencias notables.



21 predicciones diferentes para el mismo evento



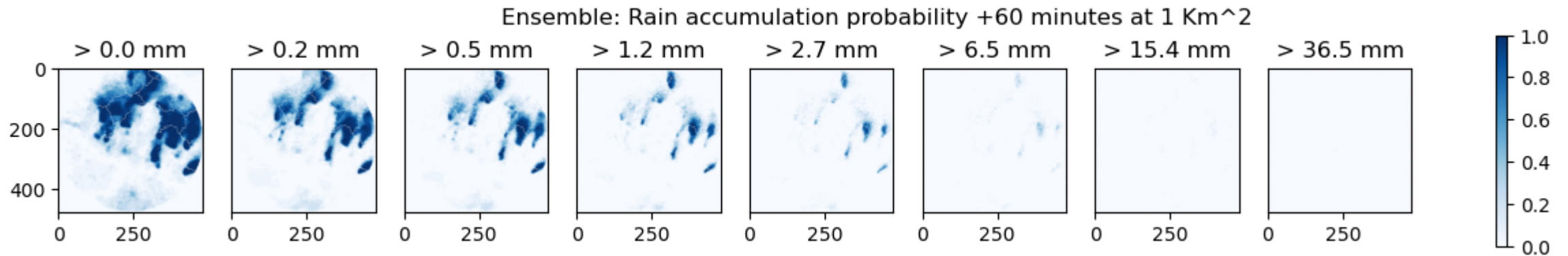
+60 minutes accumulated precipitation, best FSS: P86_rot-15



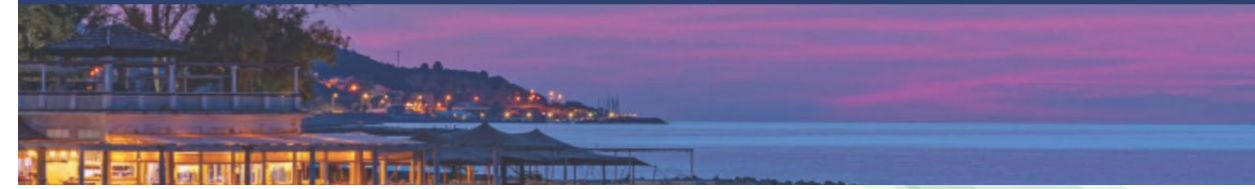
Medición de la incertidumbre



Mapas de probabilidad de diferentes intensidades de precipitación

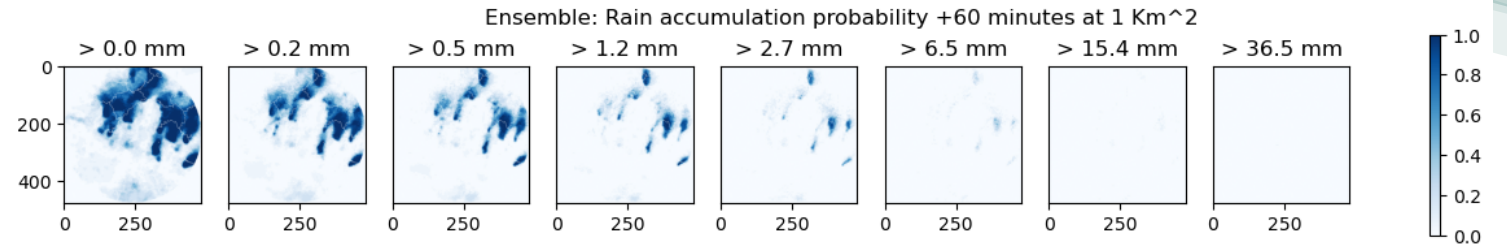


Problema: Usuarios finales no-expertos pueden tener dificultades en la interpretación

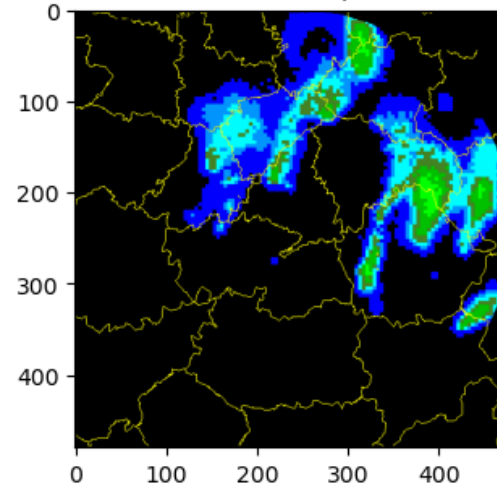


Escenarios probabilistas y extremos

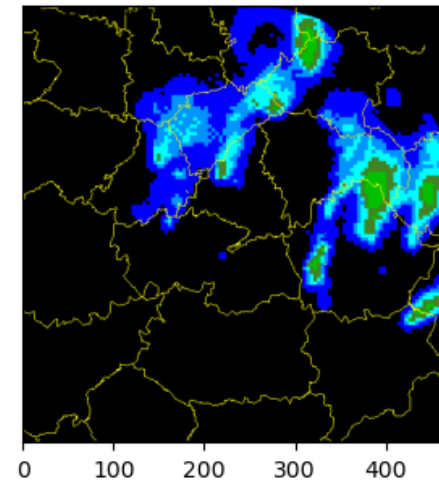
Generamos nuevas imágenes usando mapas de probabilidad



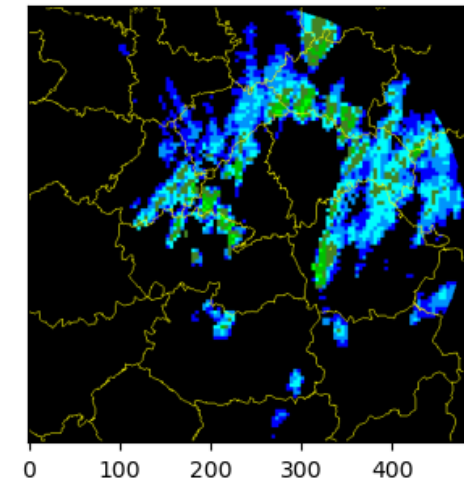
Extreme Scenario, FSS: 0.29



Probable Scenario, FSS: 0.27



Real Accumulation



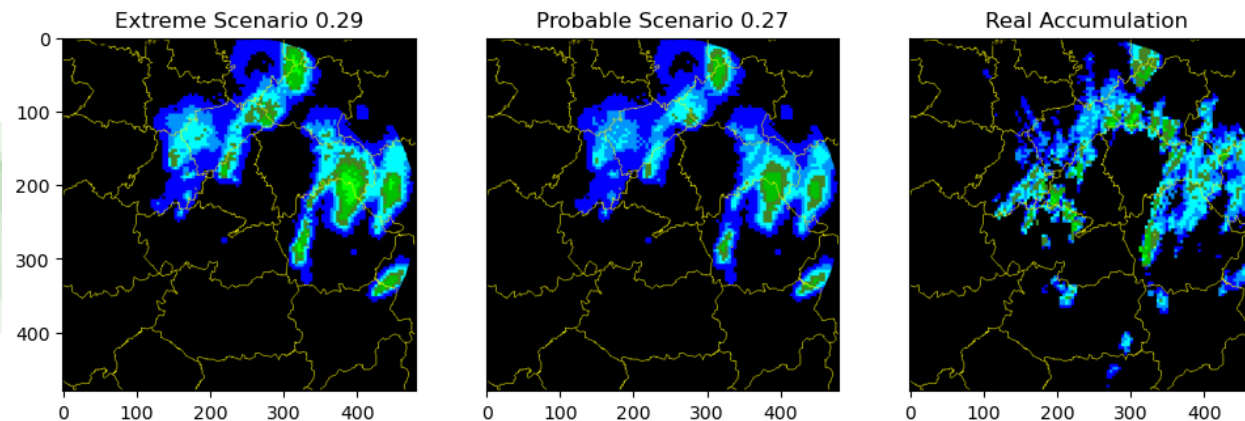
Escenarios probabilistas y extremos

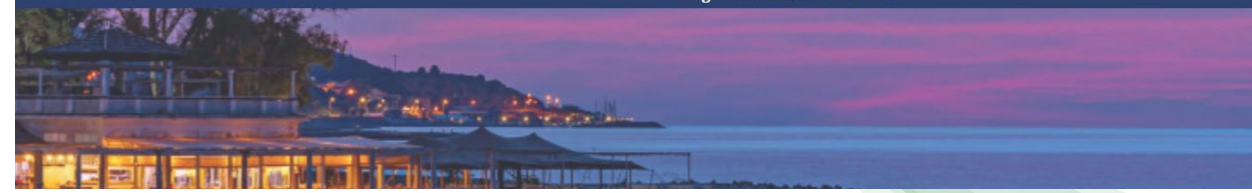
Escenario Probable:

Al menos el 60 % de los modelos predicen cierta intensidad de precipitación en un píxel.

Escenario Extremo:

Para valores de intensidad bajos se requiere una alta probabilidad.
A medida que aumenta la intensidad de la predicción, se reduce la probabilidad requerida para generar el evento.

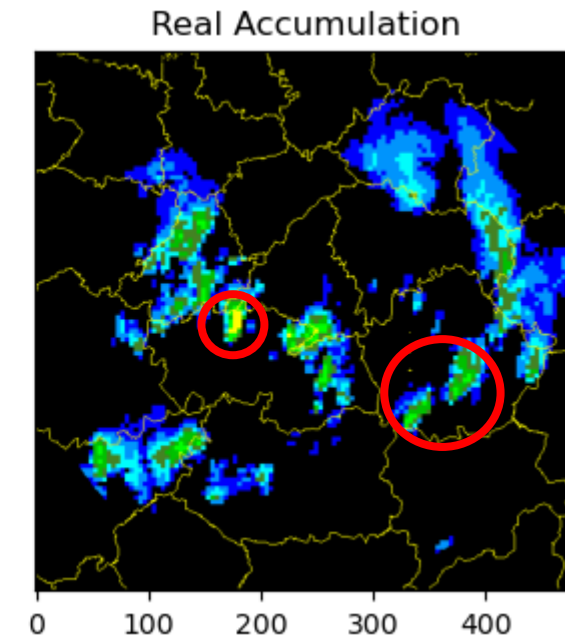
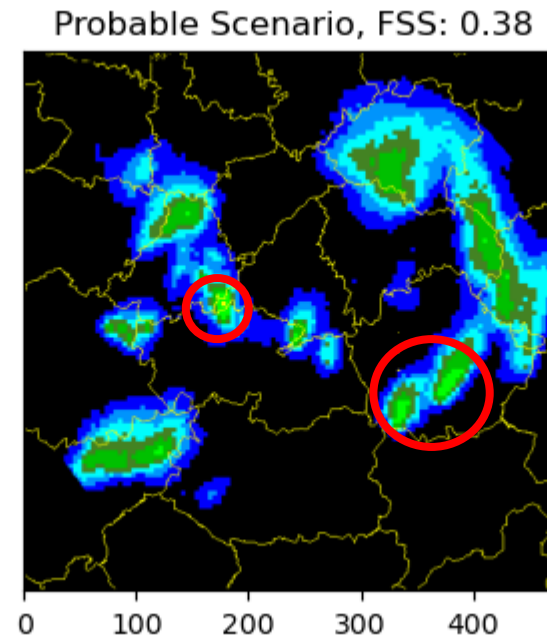
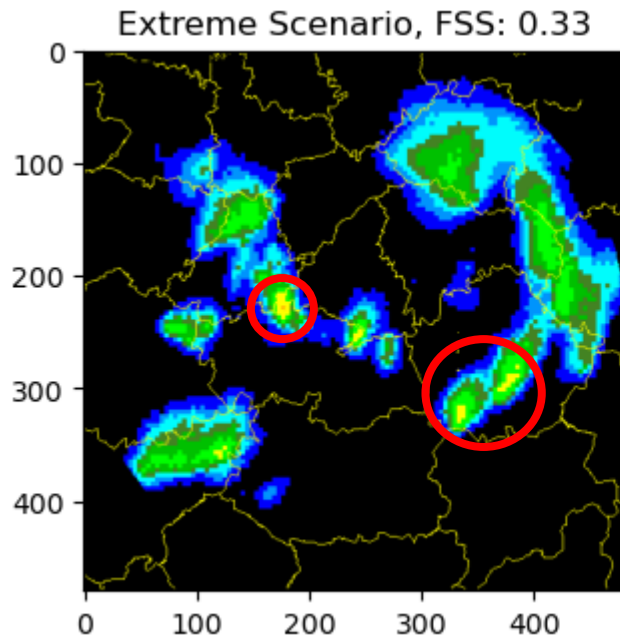




Escenarios probabilistas y extremos

A veces, las precipitaciones peligrosas solo pueden detectarse con el escenario extremo.

Sin embargo, también puede convertirse en una fuente de falsos positivos

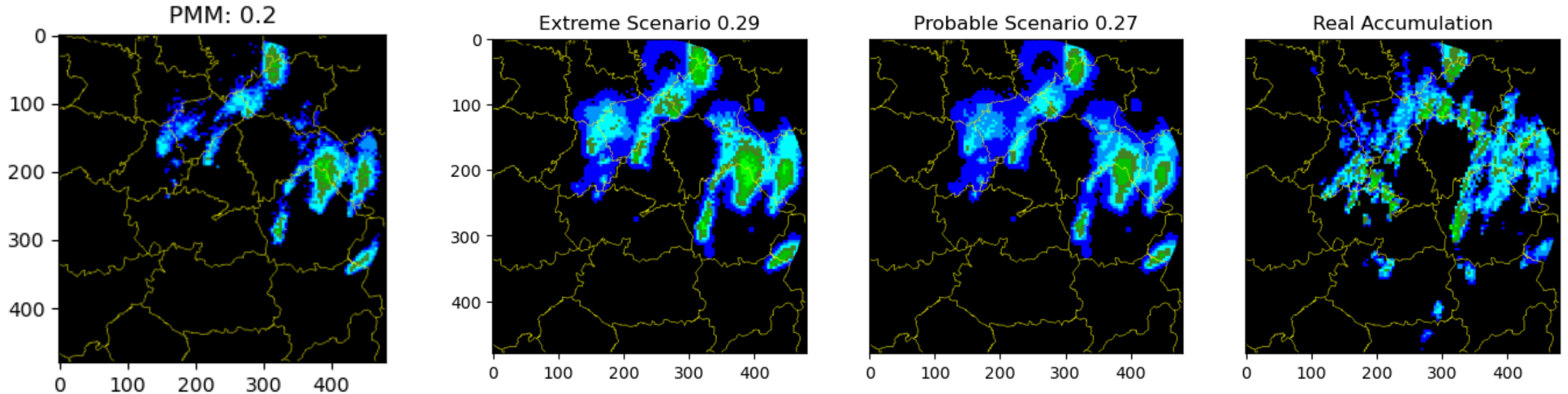


State of the art en meteorología



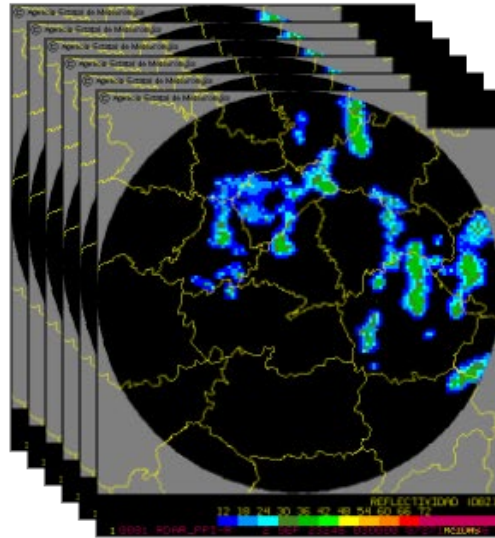
Probability Matched Mean (PMM):

Función de fusión que combina el **patrón espacial del conjunto de modelos** con la **distribución de frecuencias de los miembros individuales** para preservar **intensidades máximas realistas**

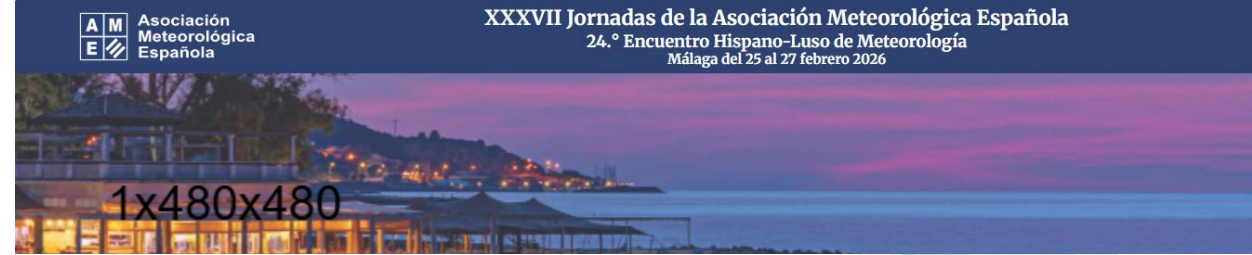


Probability Matched Mean

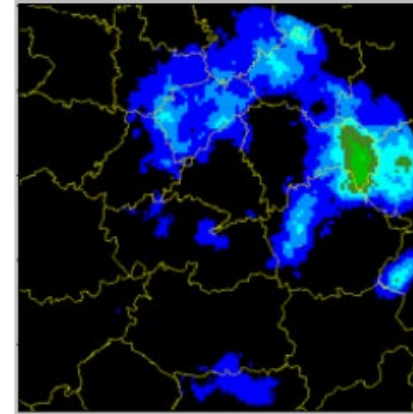
6x480x480



Mean image

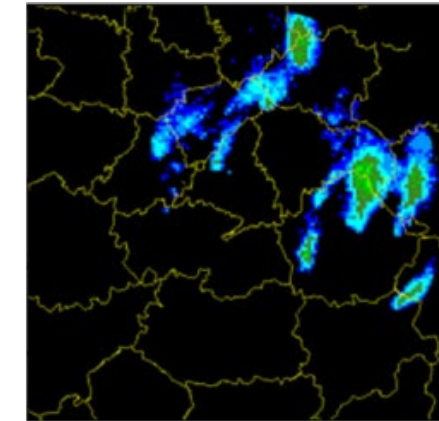


1x480x480



Output

1x480x480

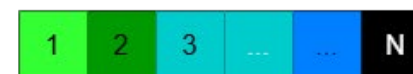
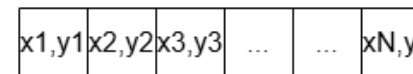


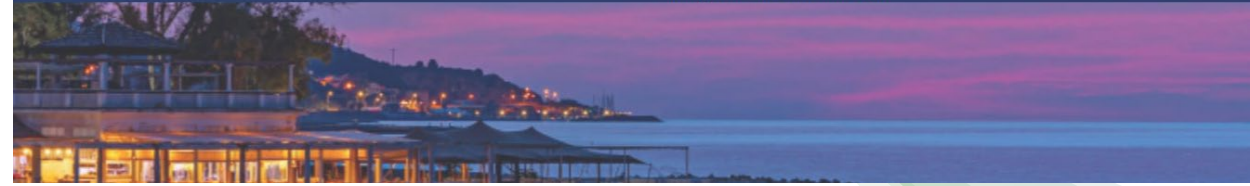
Reshape and
sort by intensity

1x(6 · 480 · 480)



1x(480 · 480)

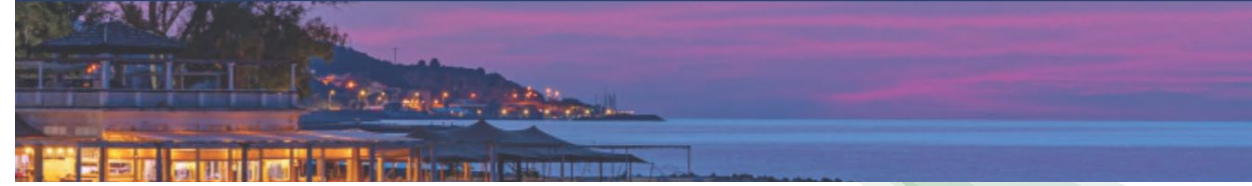




Comparación de métodos de fusión

- El **PMM** y el **Escenario Probable** obtienen, en promedio, un FSS más alto que el mejor modelo individual, por lo que la **fusión de pronósticos** es efectiva para mejorar los resultados.
- A pesar de que los **escenarios probable y extremo** tienen un desempeño inferior al PMM, a los usuarios finales les gusta la **medición de incertidumbre** que proporcionan

Fusion Method	FSS (Higher is better)
Probability Matched Mean	0.364±0.083
Probable Scenario	0.358±0.075
Best Individual Model	0.340±0.080
Extreme Scenario	0.332±0.064



Private company: Tesicnor S.L.
Iñaki Perez del Notario
Disaster risk reduction department



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa
Humberto Bustince Sola
GIARA investigation group

Agradecimientos



Gobierno de Navarra
Nafarroako Gobernua

The Government of Navarra has funded the hiring of the Ph.D. within the framework of "Doctorados Industriales 2022" grant call.



Meteorology state agency
of Spain