



anemoi

Anemoi: desarrollo del modelo de predicción meteorológica con Inteligencia Artificial en Aemet.

Evolución, primeros resultados y comportamiento en eventos extremos.

C.Toledano^{1,2}, F.Belinchón¹, T.García¹, J.Martínez¹, J.Casado¹

¹ Aemet

² Tragsatec



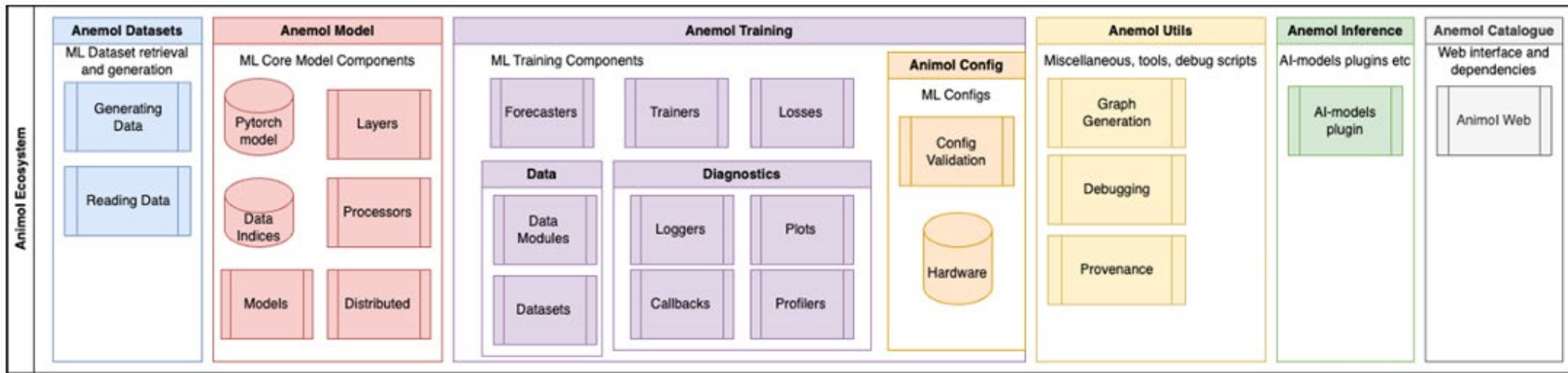
ECWMF ML PILOT PROJECT

- En junio de 2024 comienza el proyecto impulsado por el ECMWF **Machine Learning Pilot Project (MLPP)**, con el objetivo de fomentar la colaboración europea en materia del aprendizaje automático (ML) para la predicción meteorológica.
- El MLPP se centra en toda la cadena de predicción (modelos, análisis, plataformas Mlops...) y en la modelización de alta resolución/área limitada.
- **Aemet** forma parte del proyecto junto a otros servicios meteorológicos de los estados miembros.
- En el marco del proyecto se está trabajando en el desarrollo de modelos **data driven** mediante **Anemoi** y su puesta en operatividad.

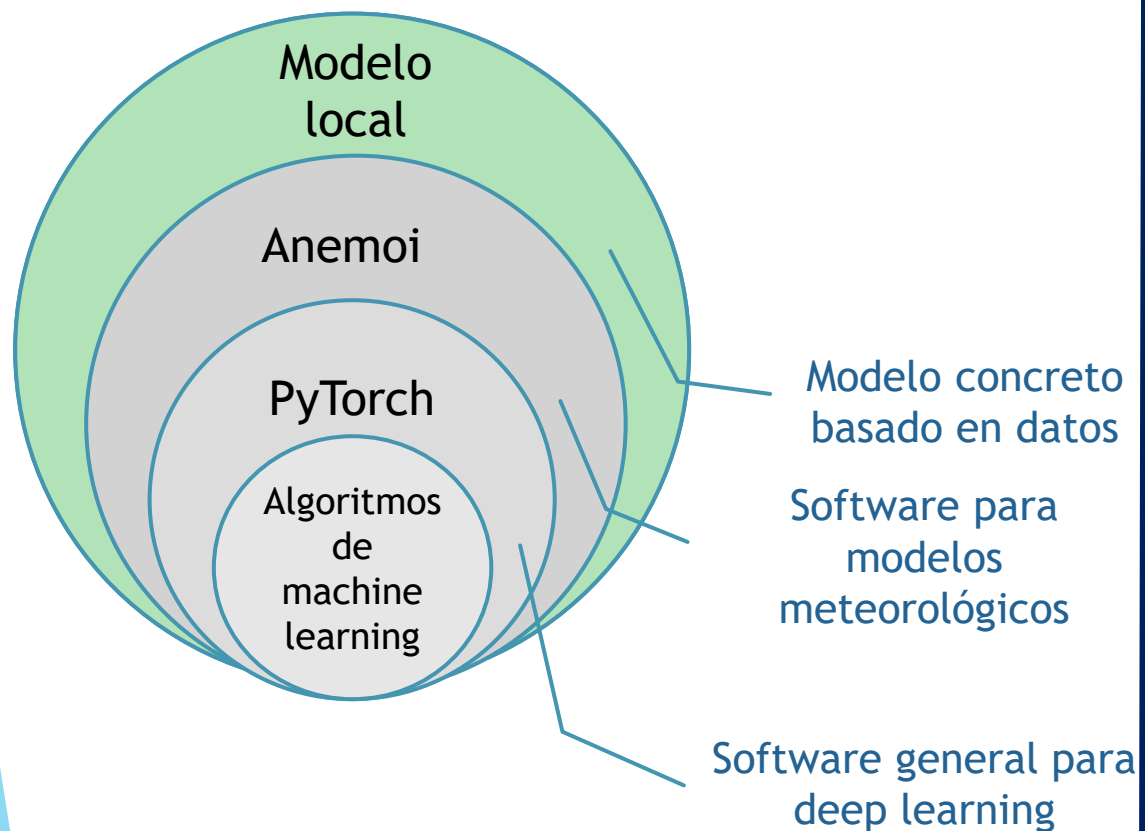


Anemoi

- Anemoi es una herramienta de software de **código abierto** en **desarrollo** destinada a la creación modelos meteorológicos basados en datos: desde la preparación de datos hasta la inferencia.
- Tiene una arquitectura altamente modular con un paquete para cada pieza de la cadena:
 - Datos: **anemoi-datasets** (<https://github.com/ecmwf/anemoi-datasets/>)
 - Grafos: **anemoi-graphs**
 - Modelo: **anemoi-models** (<https://github.com/ecmwf/anemoi-core/>)
 - Entrenamiento: **anemoi-training**
 - Inferencia: **anemoi-inference** (<https://github.com/ecmwf/anemoi-inference/>)
- Está basado en herramientas Python como **PyTorch**, Pytorch Lightning, Hydra, Pydantic, earthkit.



Aemet data driven : Los datos



Primeras pruebas con el análisis del **Harmonie-Arome v43** (2021-2025). **Datasets 6-horarios (zarr generados con anemoi-datasets):**

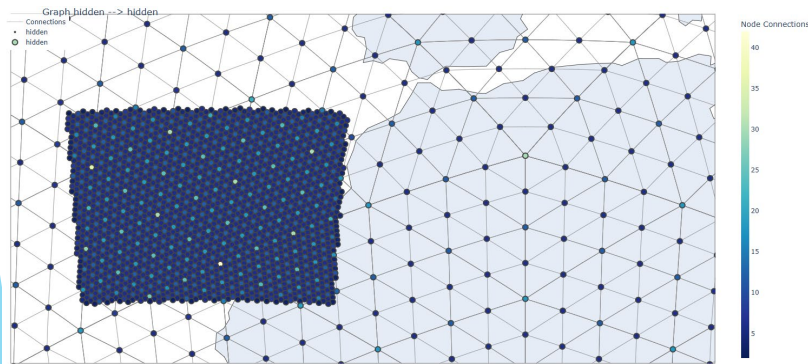
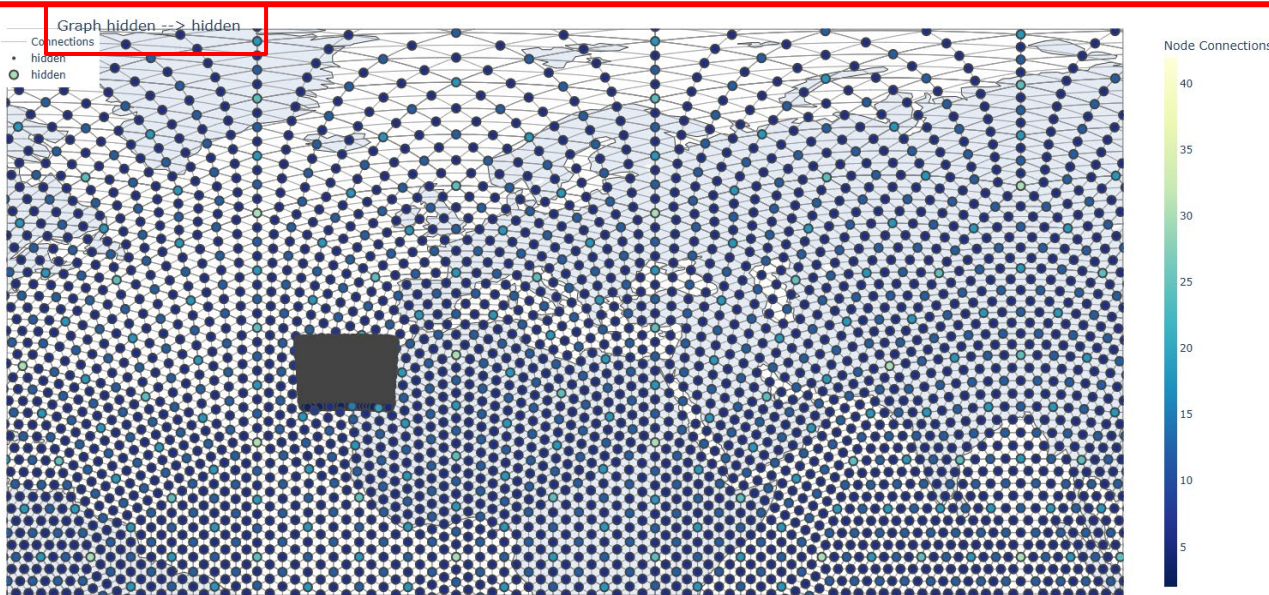
- ✓ aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-6h-v0-iberia.zarr
- ✓ aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-6h-v0-canarias.zarr

	Datasets	Trainings	Checkpoints	Models	Experiments	Matrices
Show	20	entries				
Name	Entrenamientos actuales	Size	Files	Resol.	Freq.	
aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-6h-v0-iberia	←	653 GiB	4,945	2.5 km	6h	
aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-6h-v0-canarias		170 GiB	4,929	2.5 km	6h	
aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-3h-v0-canarias		340 GiB	9,799	2.5 km	3h	
aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-3h-v1-canarias		340 GiB	9,799	2.5 km	3h	
aemet-an-harm-2p5km-2021-2024-3h-v0-iberia		1 TiB	9,815	2.5 km	3h	Pruebas interpolación
aemet-fc-harm-2p5km-2021-2025-1h-v0-canarias	←	1 TiB	35,831	2.5 km	1h	
aemet-an-harm-2p5km-2016-2021-6h-v0-iberia	←	1 TiB	7,608	2.5 km	6h	Ampliación entrenamiento 2016-2025
aemet-fc-harm-2p5km-2021-2025-1h-v2-iberia	←	5 TiB	35,847	2.5 km	1h	

Futuro: Reanálisis IBERA (1990-2020)

Aemet data driven: grafos de modelos regionales

PRIMEROS ENTRENAMIENTOS

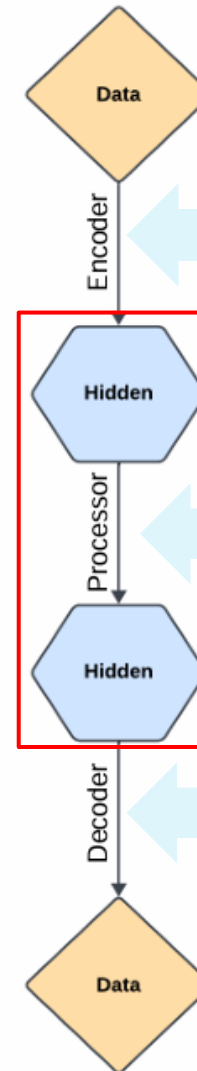


Stretched grid

Mayor resolución en la región de interés manteniendo una malla de menos resolución en el resto.

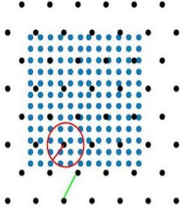
Grafo Stretched grid Canarias:
ERA5 o96 (200 km aprox.)+ Harmonie2.5km

Arquitectura

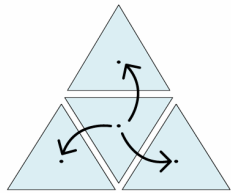


Conecta los nodos en un radio:

maximiza la información de los nodos que van al hidden, minimiza el número de aristas.



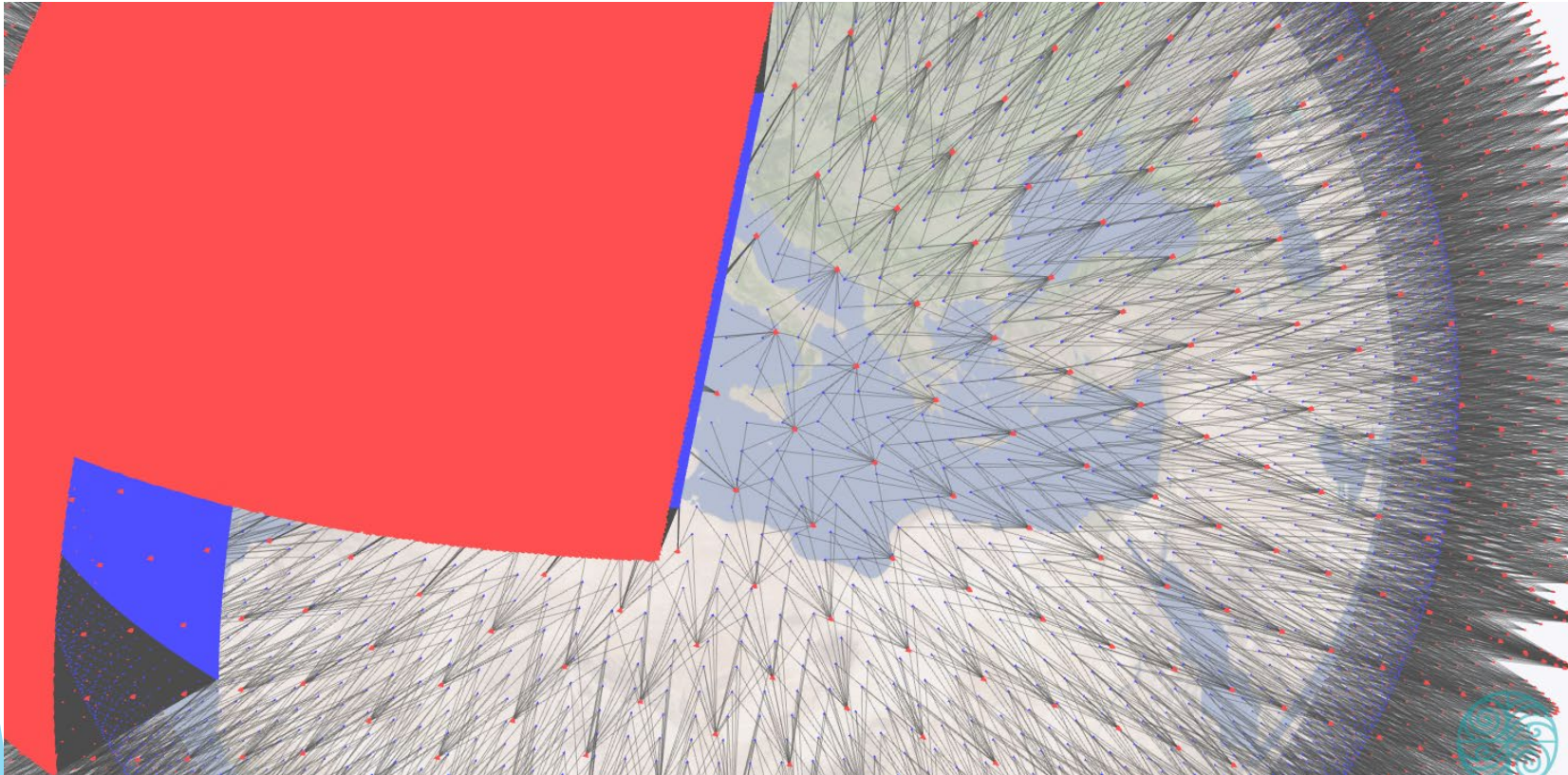
Conexiones para cada refinamiento



KNNEdges:
Conexión con los N nodos más cercanos

Aemet data driven: grafos de modelos regionales

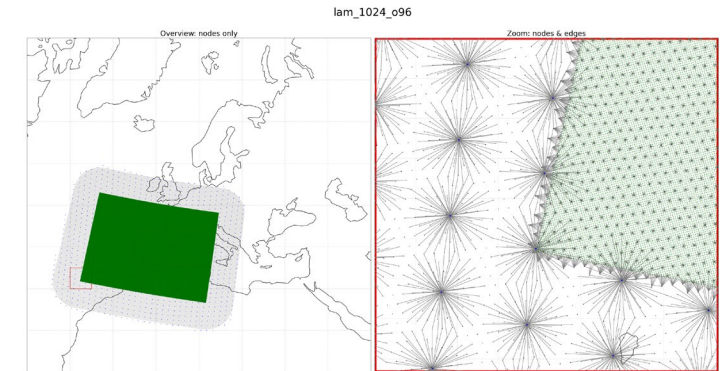
data to hidden (encoder)



Modelo **Stretched grid Iberia+Canarias:**
ERA5 o96 (200 km aprox.)+ Harmonie2.5km

LAM

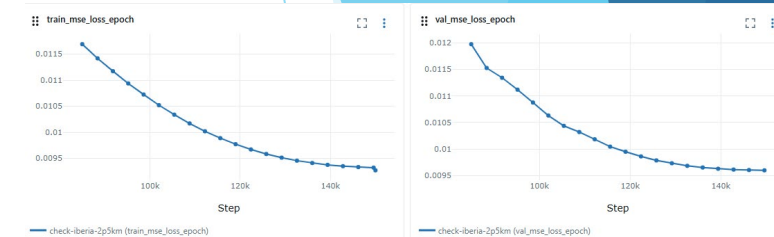
Nodos restringidos a la región limitada
(Requiere más recursos computacionales)



Nuevos entrenamientos

Aemet datadriven: Entrenamientos

- Primeros entrenamientos con **Streched grid** para **Iberia, Canarias, Iberia+Canarias**.
- Transfer Learning con CERRA (1984-2020, 5.5 km resol) y ERA5(en proceso).
- Experimentos con y sin rollout.
- Actualmente entrenamientos con LAM



Primeros entrenamientos

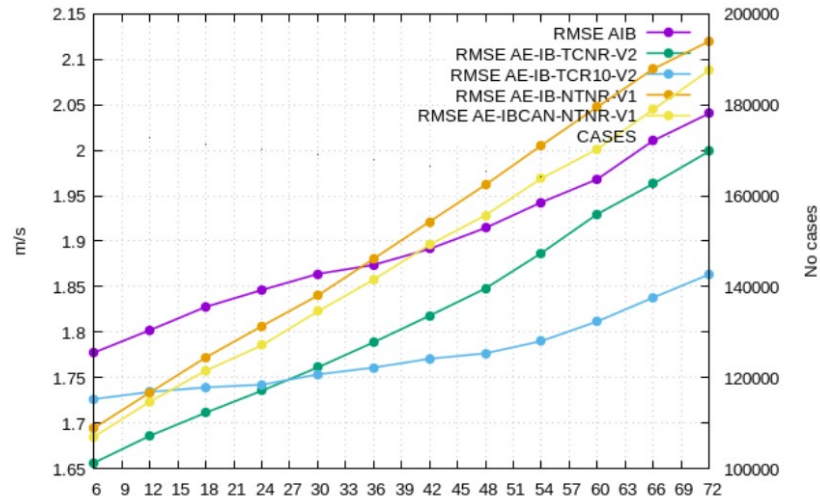
	Transfer Learning	Rollout	Grafo	Periodo entrenamiento	Datos
AE-IB-NTNR-V1	-	-	Streched grid Iberia	20210901-20231231	Aemet Harmonie Arome v43 2.5km + Era5 o96
AE-IBCAN-NTNR-V1	-	-	Streched grid Iberia+Canarias	20210901-20231231	Aemet Harmonie Arome v43 2.5km + Era5 o96
AE-IB-TCNR-V2	Sí- CERRA	-	Streched grid Iberia	1984-2018 + 20210901-20231231	Aemet Harmonie Arome v43 2.5km + Era5 o96 + CERRA
AE-IB-TCR10-V2	Sí- CERRA	10	Streched grid Iberia	1984-2018+ 20210901-20231231	Aemet Harmonie Arome v43 2.5km + Era5 o96 + CERRA

Aemet data driven: resultados a partir de la inferencia

Invierno 2025

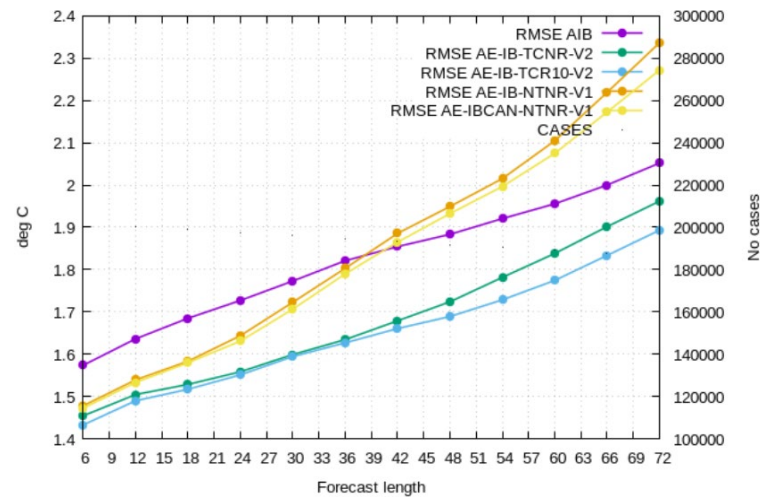
U10m

Selection: SpainPortugal using 678 stations
U10m Period: 20250101-20250331
Hours: 00,06,12,18



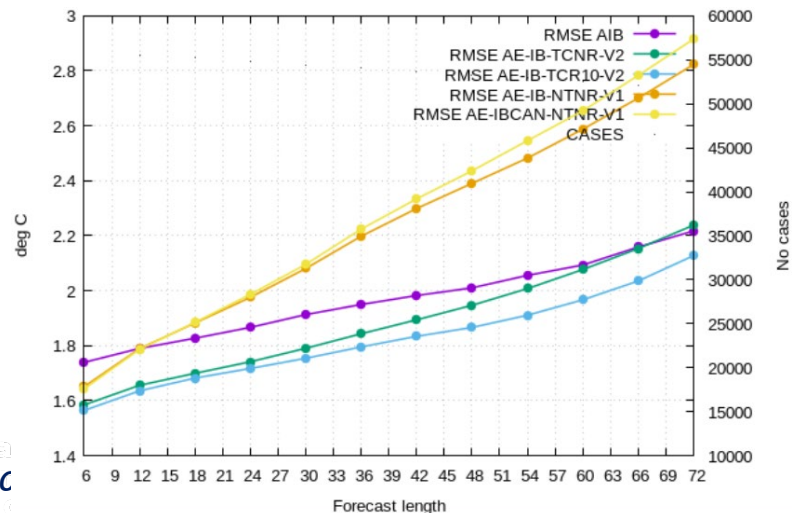
T2m

Selection: SpainPortugal using 779 stations
T2m Period: 20250101-20250331
Hours: 00,06,12,18



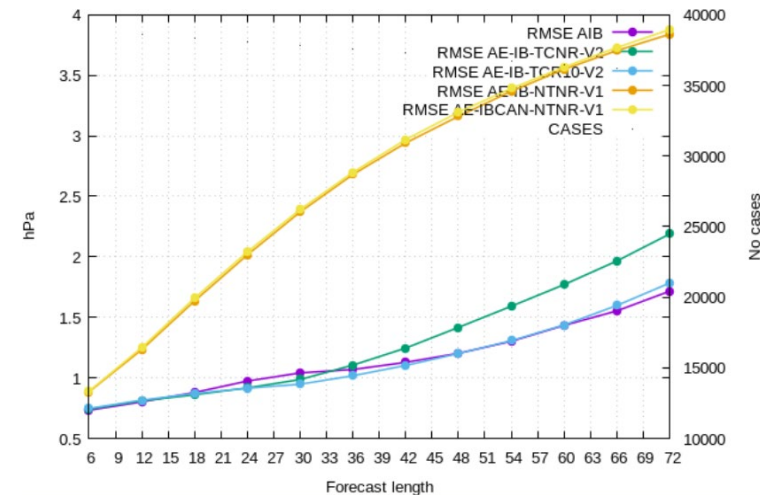
Td2m

Selection: SpainPortugal using 259 stations
Td2m Period: 20250101-20250331
Hours: 00,06,12,18



Mslp

Selection: SpainPortugal using 155 stations
Mslp Period: 20250101-20250331
Hours: 00,06,12,18

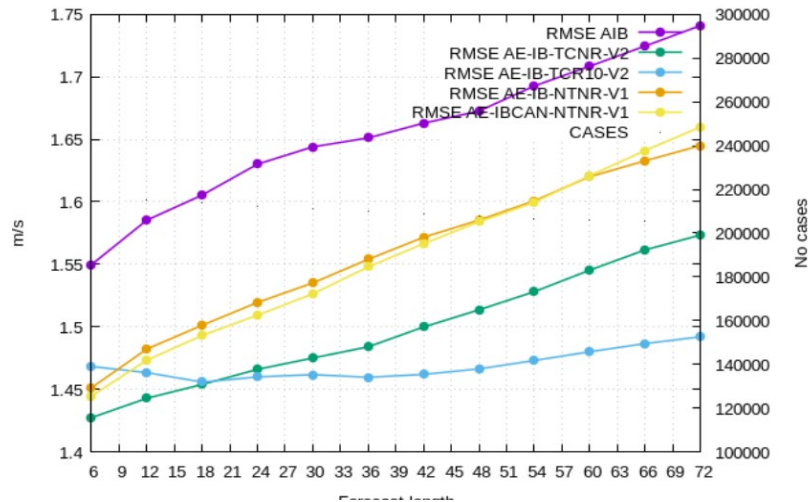


Aemet data driven: resultados

Verano 2024

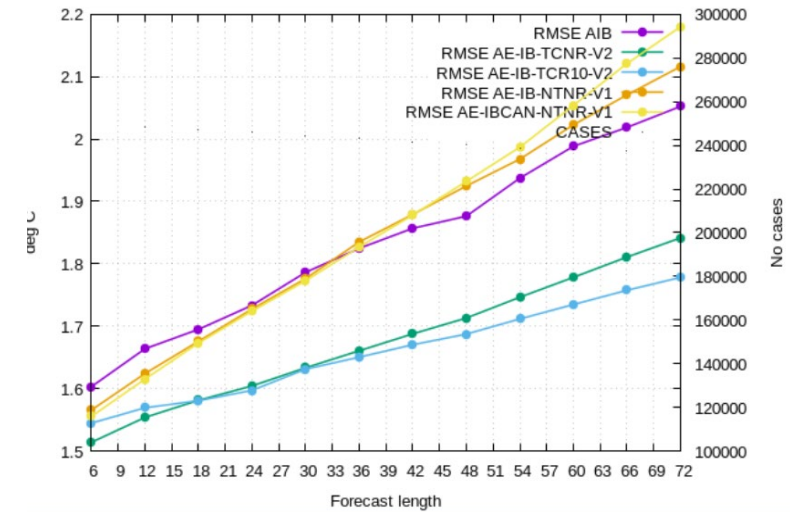
U10m

Selection: SpainPortugal using 630 stations
U10m Period: 20240601-20240831
Hours: 00,06,12,18



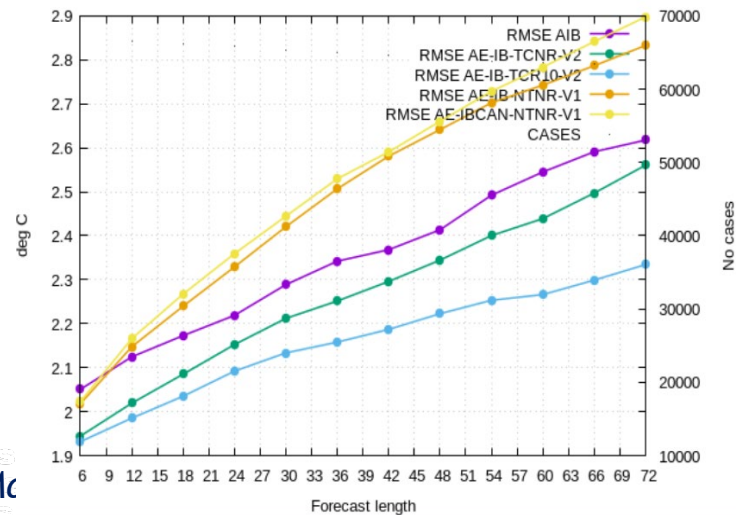
T2m

Selection: SpainPortugal using 731 stations
T2m Period: 20240601-20240831
Hours: 00,06,12,18



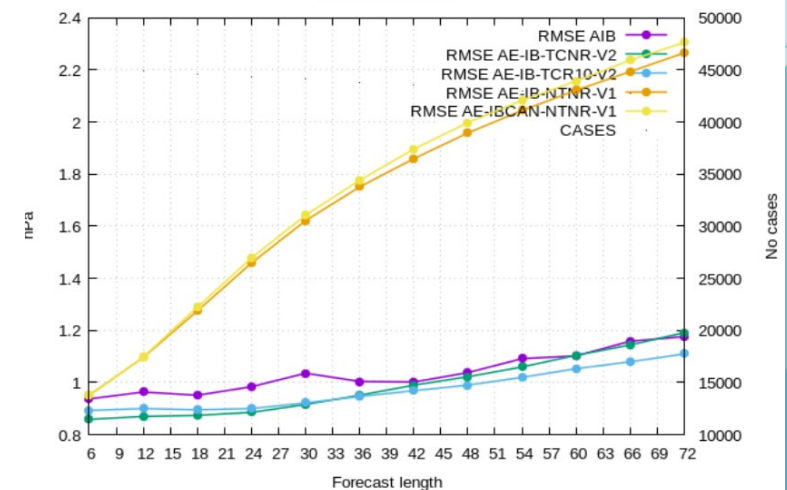
Td2m

Selection: SpainPortugal using 207 stations
Td2m Period: 20240601-20240831
Hours: 00,06,12,18



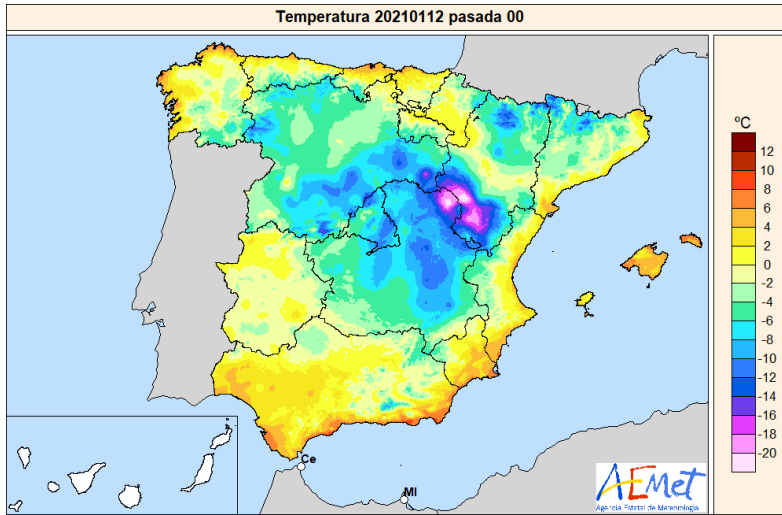
Mslp

Selection: SpainPortugal using 144 stations
Mslp Period: 20240601-20240831
Hours: 00,06,12,18

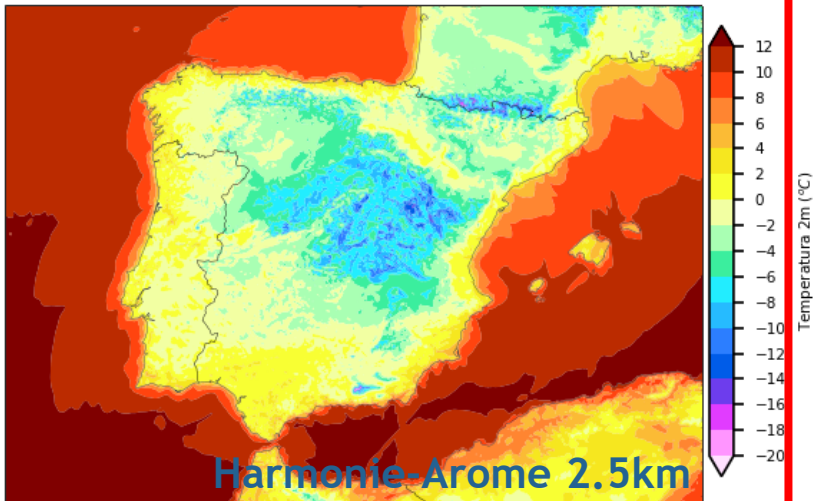


Eventos extremos: Filomena

Observaciones



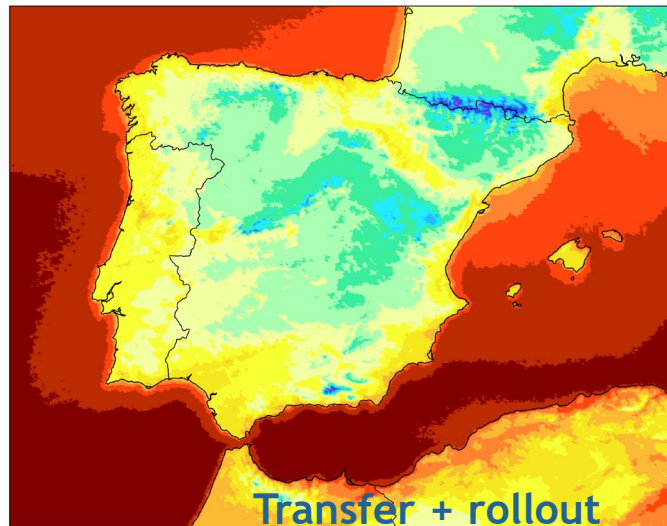
Harmonie 20210110 a 00 UTC. H48
Fecha: 2021-01-12T00
Temperatura 2t (sombreado). Unidades: °C



Predicción +48h para día 20210112 Temperatura 2t (°C)

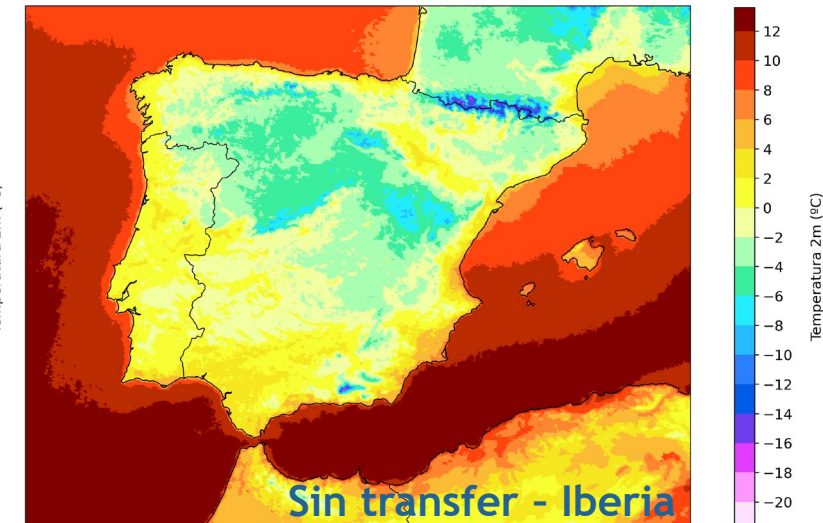
- Resultados con distintos entrenamientos de Anemoi similares
- Entrenamientos de Anemoi no captan el evento extremo, suavizando la temperatura mínima.

AE-IB-TCR10-V2 20210110 a 00 UTC. H48
Fecha: 2021-01-12T00
Temperatura 2t (sombreado). Unidades: °C



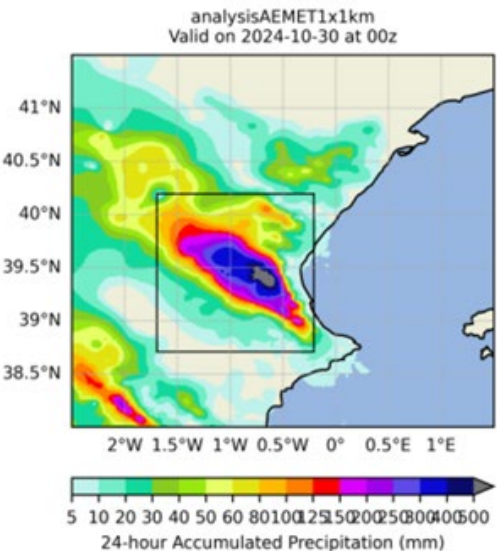
ANEMOI

AE-IB-NTNR-V2 20210110 a 00 UTC. H48
Fecha: 2021-01-12T00
Temperatura 2t (sombreado). Unidades: °C

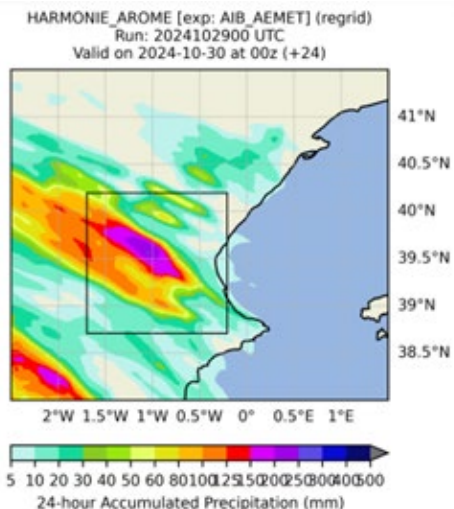


Eventos extremos: Dana 2024

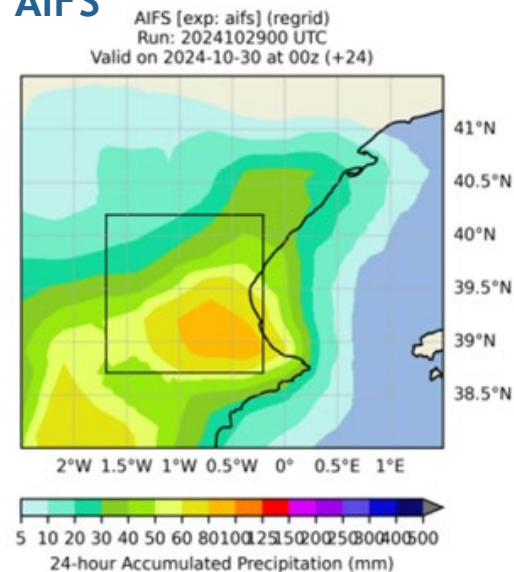
Observaciones



Harmonie-Arome 2.5km



AIFS

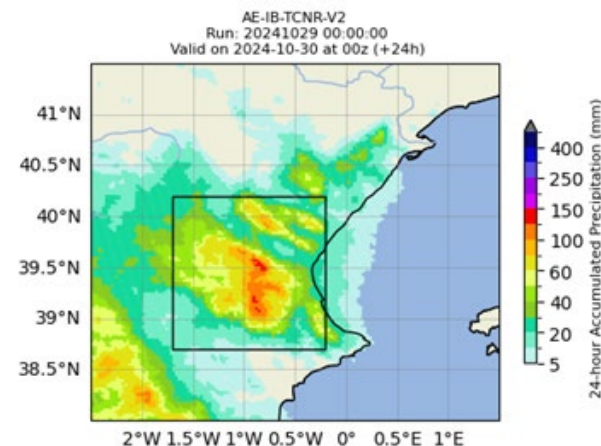


Predicción +24h para día 20241030 Acumulados 24h (mm)

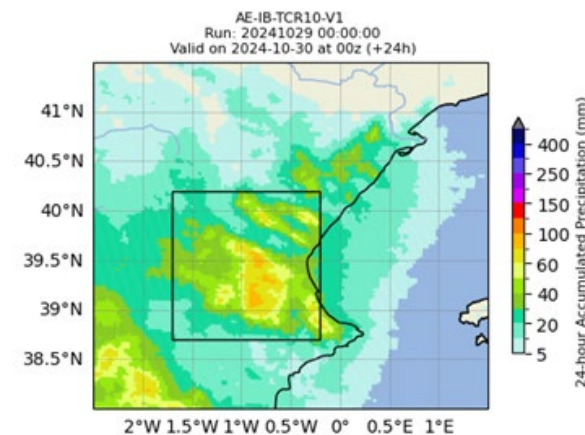
- Modelo físico con mejores resultados.
- Anemoi mejora la predicción respecto al modelo AIFS en todos los casos.
- El modelo de transfer learning ajusta mejor pero sigue suavizando los resultados.

ANEMOI

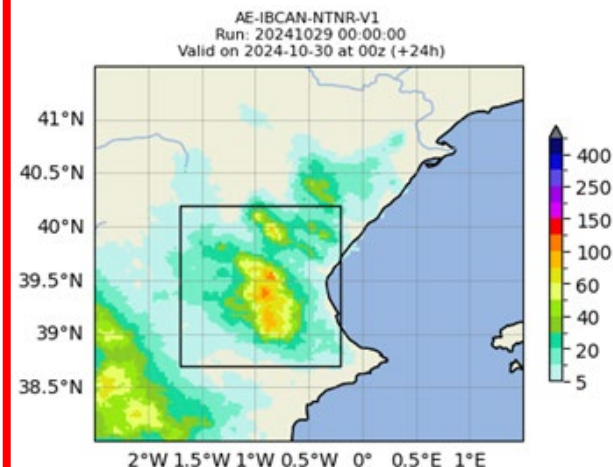
Transfer sin rollout



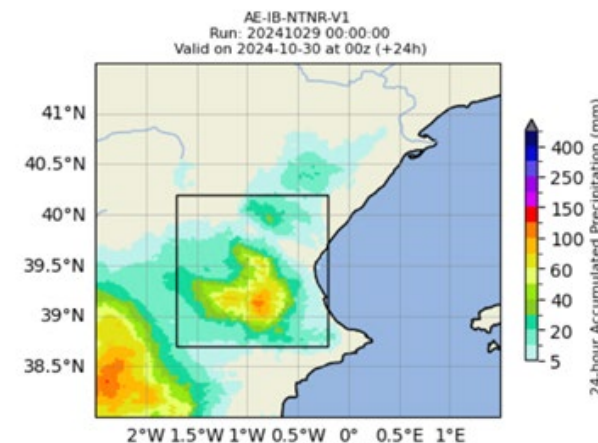
Transfer + rollout



Sin transfer-2 dominios



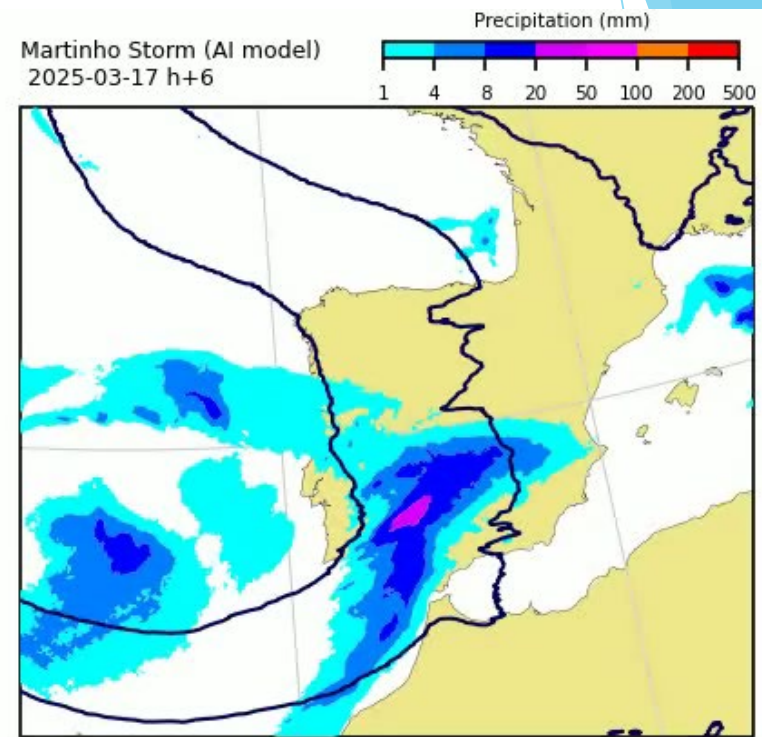
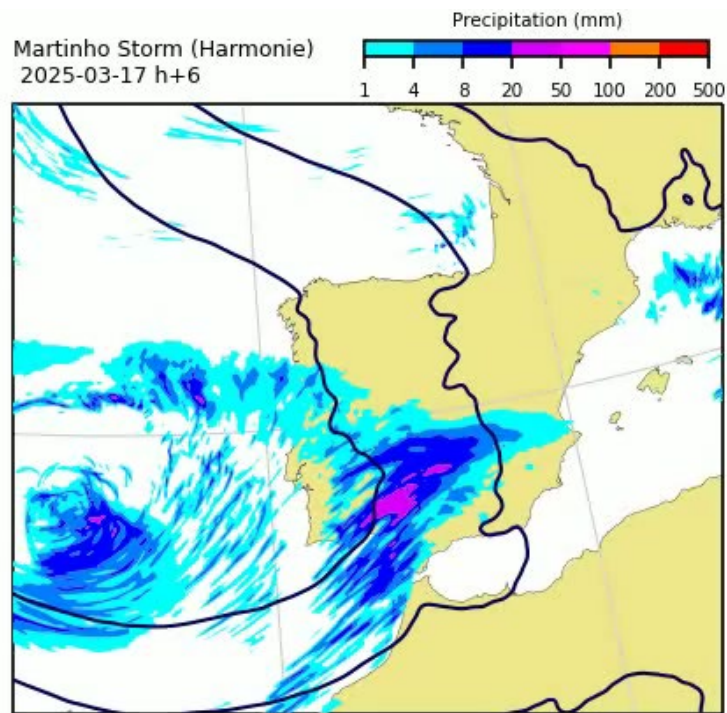
Sin transfer - Iberia



Conclusiones y trabajo futuro

- Todavía los resultados son peores que los modelos tradicionales: **suaviza los extremos**. Se ha comenzado a trabajar en el Anemoi con **predicción por conjuntos**.
- Tanto Anemoi como el modelo datadriven de Aemet están **en desarrollo**.
- Mejores resultados con Transfer Learning + rollout.
- Necesidad de predicciones horarias -> Nuevo trabajo de **interpolación**.
- Necesidad de más datos para poder usar en el entrenamiento -> Nuevo trabajo combinando datasets y observaciones.
- Nuevos experimentos con **LAM**.





Gracias!