



ALFONS CALLADO I PALLARÉS<sup>1</sup>, PAU ESCRIBÀ AYERBE<sup>1</sup> Y JOSÉ ANTONIO GARCÍA-MOYA ZAPATA<sup>2</sup>

Contribuciones de: MARC COMPTE ROVIOLA<sup>1</sup>, DAVID GIL OLIVA<sup>1</sup>, A. MARTÍN<sup>2</sup> Y J. RODRÍGUEZ<sup>2</sup> Y ERNEST WERNER HIDALGO<sup>1</sup>

1. *Delegación Territorial en Cataluña, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*
2. *Area de Innovación, AEMET*

A model can bear the mark of its designer just as surely as a song can bear the mark of its composer.  
Un modelo contiene la huella de su diseñador igual que una canción posee el sello de su compositor.

EDWARD NORTON LORENZ, 2004

El futuro de la predicción del tiempo se fundamentará en **sistema(s) de predicción por conjuntos (SPC)** que describan cada vez más detalladamente la atmósfera y sus interrelaciones con el resto de componentes del Sistema Climático: suelo, océanos, hielos y biosfera. Más *detalladamente* porque los modelos de predicción del tiempo representarán la atmósfera a escalas horizontales (y verticales) cada vez más pequeñas, desde muy pocos kilómetros a unos pocos metros. ¿Y por qué más detalladamente? Pues porque hay procesos de *mesoescala* (de 1 a 20 km en jerga de meteorólogos y modelizadores) que sólo se simulan *adecuadamente* con modelos detallados. Y que se simulen adecuadamente es determinante para poder hacer una *buena* predicción de eventos meteorológicos relevantes como por ejemplo precipitaciones intensas y/o copiosas que producen inundaciones. Y las *incertidumbres* inherentes a esas escalas y, por ende, su predecibilidad, sólo se podrán tener en cuenta con las predicciones de carácter probabilista basadas en **SPC** y no con una sola predicción determinista. En ese camino se enmarcan los actuales **SPC de área limitada** (una zona más o menos rectangular de la Tierra), de *alta resolución* (1-4 km), *convection permitting* (sin parametrizar la convección), anidados en *modelos globales* (todo el planeta), como el AEMET- $\gamma$ SREPS de **AEMET**.

**Palabras clave:** sistema de predicción por conjuntos AEMET- $\gamma$ SREPS, proyecto AEMET- $\gamma$ SREPS, multimodelo-multicontorno, incertidumbre en escala convectiva, sistemas de predicción por conjuntos de alta resolución.

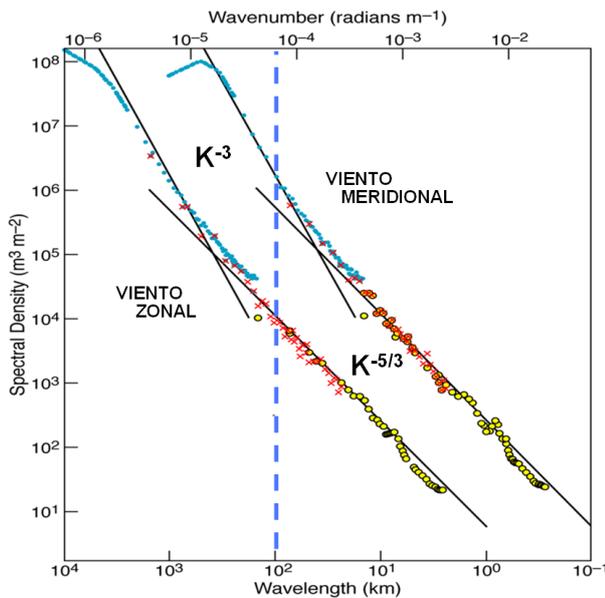


Figura 22.1: Espectro de energía del viento zonal y meridional de LINDBORG [11]. La línea vertical azul marca aproximadamente el cambio del espectro entre los regímenes sinóptico y convectivo con espectros de energía de  $K^{-3}$  y  $K^{-5/3}$  respectivamente.

## 22.1 La incertidumbre en la escala convectiva

Las incertidumbres en la escala *convectiva* o *mesoescala* tienen unas implicaciones diferentes a las de la escala sinóptica, implicaciones que las convierten en relevantes, sobretodo en las predicciones cada vez más *detalladas* en zonas cada vez más pequeñas con fenómenos meteorológicos más locales. Vamos a dar las ideas más importantes en esta sección, pero no hay duda de que por su importancia en la evolución futura tanto de los SPC globales y regionales a altas resoluciones, como de la predicción operativa más local, merecería un capítulo entero en el presente volumen.

**Escalas sinóptica y convectiva.** En el presente capítulo y por simplicidad, aunque puede prevalecer el enfoque didáctico por encima del rigor científico, el fondo de la cuestión aparece en toda su magnitud. En este contexto, nos referimos a la escala convectiva, del orden de 1-10 km, claramente subsinóptica y a escalas sinópticas del orden de 10-1000 km, que en una clasificación de ORLANSKI [15] (cap. 6 en la página 67 y sec. 13.10 en la página 174) de las escalas espacio-temporales de la atmósfera, corresponderían más o menos la escala convectiva a las escalas meso- $\gamma$  y meso- $\beta$  y, por otro lado, la escala sinóptica a las meso- $\alpha$  y sinóptica de ORLANSKI, respectivamente.

### 22.1.1 La atmósfera en la escala convectiva y el espectro de energía $K^{-5/3}$

La atmósfera incluye multitud de diferentes escalas de diferentes fenómenos atmosféricos [15] (cap. 6 en la página 67), desde la escala casi molecular, e. g. las ondas sonoras, hasta la circulación general, e. g. fenómenos como el ENSO-El Niño (sec. 29.2.1 en la página 484) y todas interaccionan y se influyen entre ellas como un todo continuo e interrelacionado. Nuestras observaciones de la atmósfera, como las clásicas desde aviones en nivel de vuelo cerca de la tropopausa de NASTROM-GAGE [11], muestran unos regímenes de interacciones entre escalas diferentes, en particular entre la escala convectiva y la escala sinóptica.

En la Figura 22.1 se observa, para cada una de las componentes del viento, un régimen del espectro de energía que sigue un  $K^{-3}$  en la escala sinóptica y  $K^{-5/3}$  en las escala convectiva. Sólo los modelos de predicción del tiempo de alta resolución, como los modelos que integran el SPC AEMET- $\gamma$ SREPS *no hidrostáticos* (sec. 6.3.2 en la página 78) y *convection-permitting*, parecen ser capaces de reproducir parcialmente el régimen de la escala convectiva con el espectro  $K^{-5/3}$  y, por tanto, describir el cambio de régimen entre escalas. Este es un punto importante a favor de los modelos y SPC de alta resolución, sobre todo si queremos reproducir la atmósfera cada vez más detallada y fidedignamente.

### 22.1.2 El límite inherente de predecibilidad en la escala convectiva

La escala convectiva, con el espectro de energía  $K^{-5/3}$ , tiene un límite inherente de *predecibilidad* independientemente de tener, por ejemplo, mejores condiciones iniciales para un modelo de alta resolución. Esto no sucede en la escala sinóptica con el espectro de energía  $K^{-3}$ , donde, por ejemplo, si se mejora un 10% la condición inicial a través de las observaciones, la predicción a 24 horas mejorará un 1%: la mejora no es lineal, pero existe. En la escala convectiva la mejora sería de un 0%. Las escalas convectivas son inherentemente inciertas, siendo el límite de su predecibilidad independiente de las condiciones iniciales. Uno de los pioneros en el error del modelo (sec. 5.3 en la página 62), el meteorólogo EDWARD N. LORENZ, ya se dio cuenta de ello a finales de los años 60 del siglo XX [13] (sec. 5.3.1 en la página 62).

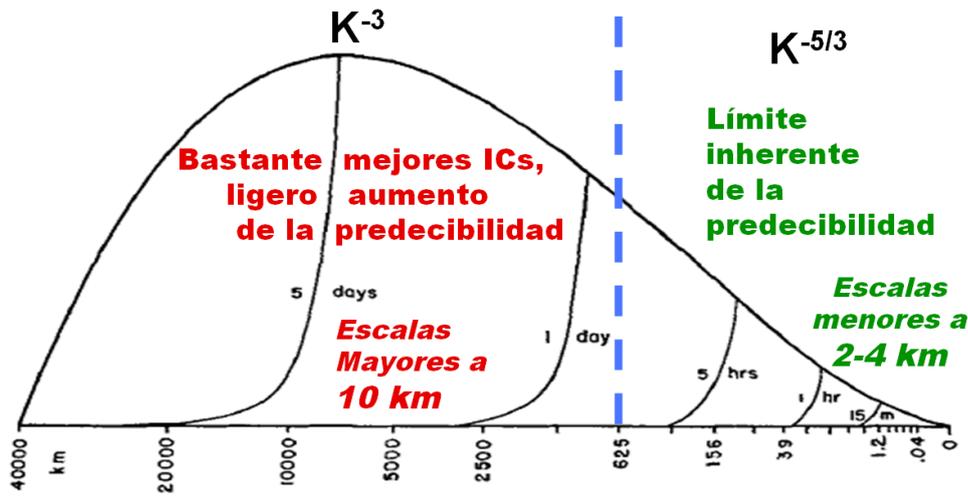


Figura 22.2: Reproducción del espectro de energía (línea negra superior envolvente) y espectro de energía del error (curvas negras ascendentes de 5 días, 1 día, 5 horas, 1 hora y 15 minutos) de E. N. LORENZ (1969 [13]). La línea azul vertical marca aproximadamente el cambio del espectro entre los regímenes sinóptico y convectivo con espectros de energía de  $K^{-3}$  y  $K^{-5/3}$  respectivamente.

LORENZ no lo hizo con un modelo común de la atmósfera, sino con uno simplificado teórico, pero que retenía la esencia del problema atmosférico. Ésta es una práctica muy común entre meteorólogos-modelizadores-teóricos.

Con nostalgia, en la Figura 22.2 se reproduce una gráfica con sus resultados, donde se muestran donde se situarían las escalas sinóptica y convectiva.

Más tarde se comprobó que *el límite inherente de la predicibilidad en las escalas convectivas en la práctica de los modelos de predicción del tiempo reales se sitúa entorno de las 12 horas* [7]. Por suerte, superior a las 5 horas estimadas con el modelo de LORENZ de 1969 [14]. Todo ello condiciona la aplicabilidad de las técnicas y metodologías clásicas en modelización de la escala sinóptica al pasar a la escala convectiva [6, 7]. Este descubrimiento es un importante jarro de agua fría para el avance de la predicción del tiempo y, simultáneamente, un interesante reto para los meteorólogos-modelizadores.

Antes de ahondar más en el límite de predicibilidad a escalas convectivas, debemos advertir algunos puntos:

1. La predicibilidad depende del flujo, es decir, depende de cada situación meteorológica: en una puede ser de sólo 6 horas, por ejemplo en algún caso con mucha inestabilidad convectiva y, en otros casos, llegar más allá de 24 horas, por ejemplo una situación estable anticiclónica.
2. Las mejoras en los modelos sí que pueden aumentar de manera efectiva el límite inherente

de predicibilidad, a diferencia de las mejoras en las condiciones iniciales.

3. A pesar de lo comentado en el punto anterior, con mejores condiciones iniciales, por ejemplo asimilando datos de radar en modelos de los SPC de alta resolución, sí que se pueden mejorar las predicciones. Eso sí, sólo antes de llegar al límite de predicibilidad inherente.

### 22.1.3 Modelos y SPC en la escala convectiva

Para ejemplificar el futuro de los modelos y, sobre todo, de los SPC a escala convectiva, haremos uso de uno de los modelos simplificados de la atmósfera más utilizados a nivel teórico de nuestro laureado gurú E. N. LORENZ: el denominado modelo de LORENZ 96. En la Figura 22.3 en la página siguiente podemos visualizar el modelo LORENZ'96 [14] que nosotros interpretaremos que reproduce la interacción caótica de dos escalas: en rojo la escala convectiva y en verde la escala sinóptica.

¿Qué pasaría si analizáramos los errores (e incertidumbres) en ambas escalas? Pues el resultado puede verse en la Figura 22.4 en la página 337, siguiendo los trabajos de LORENZ:

- El error en las escalas convectivas (línea roja) crece rápidamente hasta saturarse al cabo de unas 12 horas. La saturación del error se produce cuando es tan grande que ya no hay más crecimiento: la curva se pone horizontal.

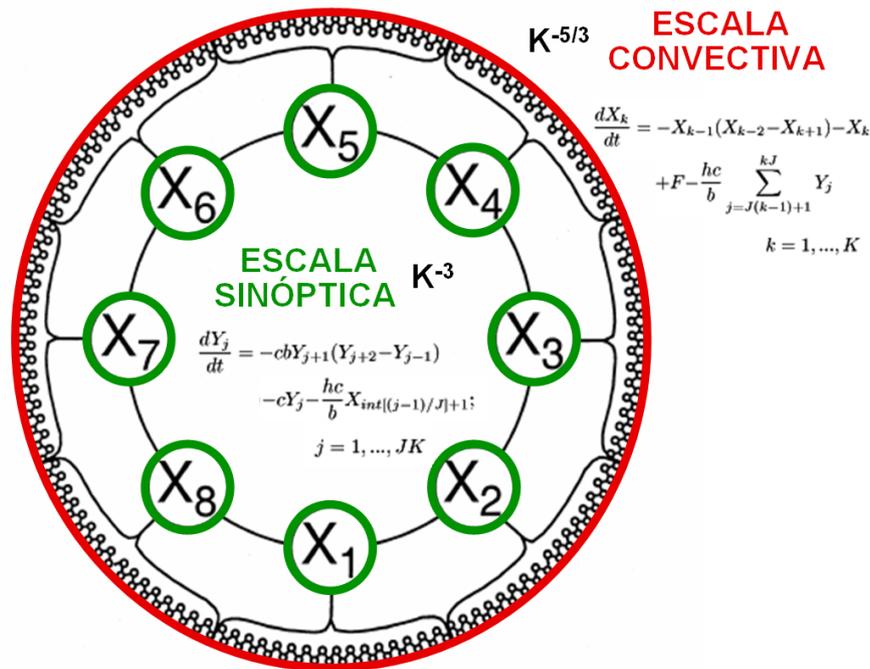


Figura 22.3: Reproducción de WILKS [21] del modelo de LORENZ 96. En rojo se representan la escala convectiva y en verde la sinóptica: las líneas negras representan los flujos de las interacciones intra-escalas e inter-escalas. Anecdóticamente, se reproducen las dos ecuaciones de LORENZ 96 para ambas escalas, donde el último término de cada ecuación representa las interacciones entre ellas.

- El error en escalas sinópticas (línea verde) crece rápidamente al principio por influencia de las escalas convectivas pero, llegada la saturación del error de estas últimas, crece a su propio ritmo, más lenta y continuamente y sin llegar a la saturación: esa saturación llegaría hacia los 10-20 días en los modelos operacionales.

Profundicemos algo más en las enseñanzas de la Figura 22.4 en la página siguiente. Las escalas convectivas son el fruto de flujos en tres dimensiones (3D), es decir, tanto en la horizontal como en la vertical y, tales circulaciones, no están balanceadas o en equilibrio con su entorno. En los modelos y, para simular consistentemente en especial la inestabilidad convectiva, se precisa asimilar (cap. 16 en la página 243) observaciones de su propia escala tales como las reflectividades de los radares meteorológicos (con resoluciones alrededor de 1 km). La línea de puntos marrón de la Figura 22.4 en la página siguiente quiere representar cómo nos gustaría tener en cuenta las fuentes de incertidumbre en un SPC de alta resolución bien diseñado. Se necesitarían unas condiciones iniciales (IC por sus siglas en inglés) adecuadas a la escala (e. g. asimilación de radar) y un buen tratamiento del error del modelo (MO) para la escala convectiva (Tabla 17.5 en

la página 272, sec. 17.5 en la página 271).

A diferencia de las escalas convectivas, las escalas sinópticas representan flujos y circulaciones más restringidos a la horizontal (2D), por balances cinéticos y energéticos respectivamente. Estamos en el régimen del espectro de energía  $K^{-3}$ , de la llamada inestabilidad baroclínica o **baroclina**, sin límite inherente de la predecibilidad y un crecimiento del error e incertidumbres más controlado: mucho más sencillo de simular por un modelo.

Para un modelo de muy alta resolución, las escalas que se resuelven a partir de unas 12 horas, sin el error saturado, son las mesoescalares y las sinópticas. Para un SPC regional se pueden aplicar los métodos clásicos y los errores e incertidumbres se pueden tratar a través de las condiciones de contorno de modelos o SPC globales (LBC por sus siglas en inglés) y los métodos usuales para el error del modelo (ver cap. 17 en la página 257). Una buena simulación de las incertidumbres en un SPC, representada por la línea de puntos marrón, es el objetivo de cualquier SPC de alta resolución y se considera factible con un SPC bien diseñado.

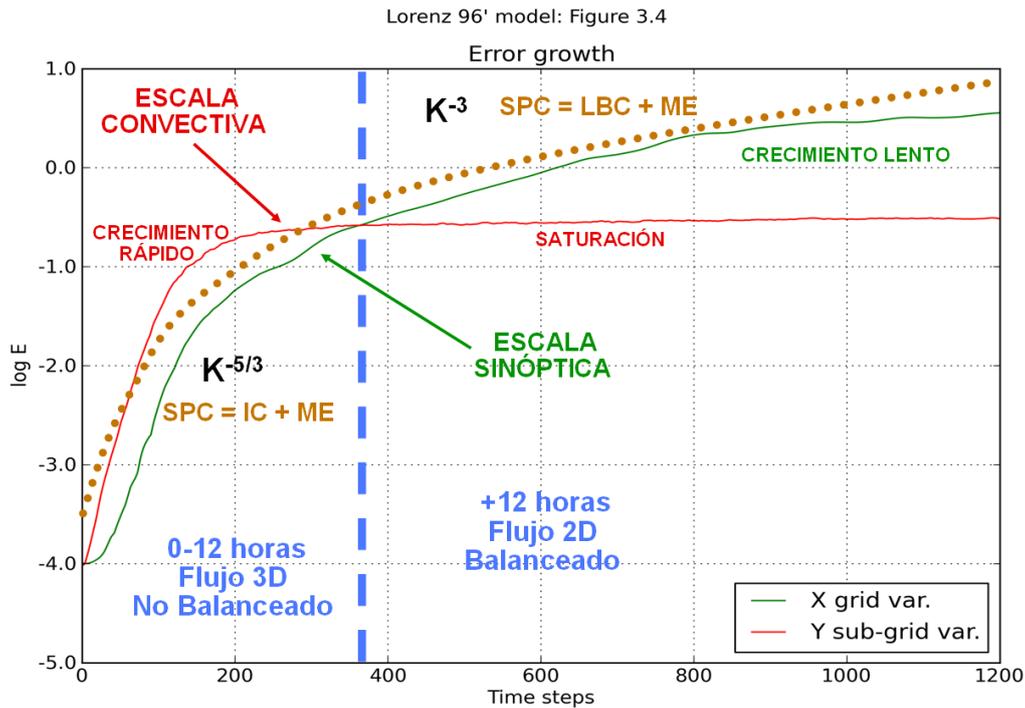


Figura 22.4: Crecimiento del error en el modelo de Lorenz 96: en rojo las escalas de procesos rápidos interpretados como escala convectiva; y en verde las escalas de procesos lentos interpretados como escala sinóptica. La línea azul vertical marca aproximadamente el cambio del espectro entre los regímenes sinóptico y convectivo con espectros de energía de  $K^{-3}$  y  $K^{-5/3}$  respectivamente. Ver texto para más detalles.

#### 22.1.4 ¿Y por qué SPC en la escala convectiva o kilométrica?

Responderemos a la pregunta en dos pasos siguiendo a uno de los pioneros de los SPC y errores del modelo, TIM PALMER [16].

El primer paso: hay multitud de razones para evolucionar los modelos de predicción del tiempo a no hidrostáticos (sec. 6.3.2 en la página 78) y convection-permitting en las altas resoluciones y, con ellos, los SPC en las escalas convectivas de las cuales, por su relevancia en latitudes medias, listamos las siguientes sin pretender ser exhaustivos:

- Mejores condiciones de contorno inferiores: mejor orografía, mejor descripción de los límites costeros, de usos del suelo, etcétera.
- Asimilación de observaciones de alta resolución, como las reflectividades radar, datos de satélites de alta resolución, etcétera.
- Simular explícitamente la inestabilidad convectiva con la dinámica del modelo y no en las parametrizaciones físicas (es decir, *convection-permitting*), al igual que la inestabilidad baroclínica o *baroclina*, facilitando la simulación de la organización de la convección en sistemas como *líneas de turbonada*,

*sistema convectivo de mesoescala (SCM)*, etcétera, organización muy limitada en los modelos con la convección parametrizada en la física.

- Simular mejor la rotura de ondas de ROSSBY (sec. 6.3.3 en la página 80) y por ende la persistencia de bloqueos anticiclónicos, etcétera.
- Posibilidad de mejores detalles de procesos en la física como la *Planetary Boundary Layer (PBL)* (turbulencia) y la evolución de las nubes o microfísica de nubes (condensación de la gran escala).

Y el segundo paso: ¿Qué sucede una vez que mudamos nuestros modelos a las escalas convectivas, no del todo inherentemente inciertas, pero sí en las que crece rápidamente el error de la predicción hasta saturarse en las 12 horas? Pues sucede que la aproximación determinista, es decir, hacer una predicción con un modelo determinista, pierde sentido. Estamos en una escala tan incierta que la predicción es sólo posible incorporando la probabilidad de forma natural en nuestro sistema predictivo. La única predicción consistente y viable a escalas convectivas se fundamenta en tener en cuenta las incertidumbres con un SPC de alta resolución no hidrostático (sec. 6.3.2 en la página 78) y convection permitting, como el AEMET- $\gamma$ SREPS presentado en este capítulo.

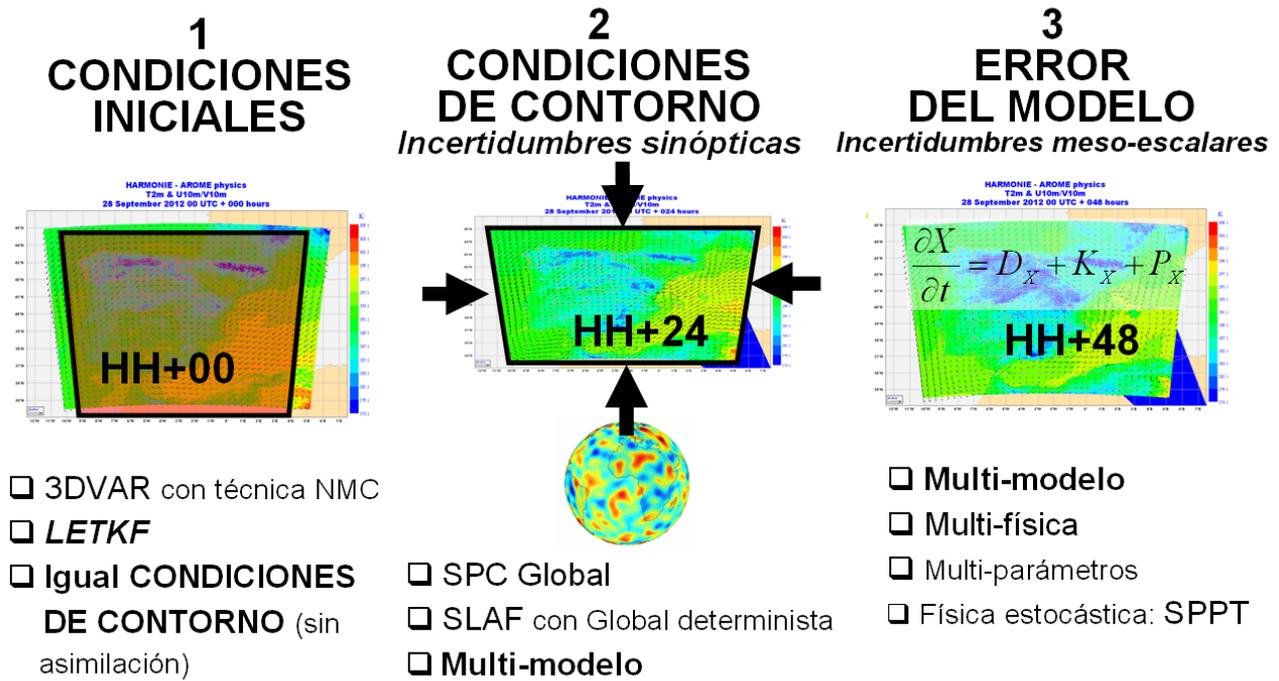


Figura 22.5: Técnicas más empleadas en los SPC de alta resolución para tener en cuenta las tres fuentes de incertidumbre. En **negrita** las usadas en Harmon-EPS (SPC de HIRLAM-ALADIN) y en AEMET- $\gamma$ SREPS.

## 22.2 SPC de alta resolución

En la Figura 22.5 se muestran las diferentes técnicas más usualmente utilizadas, en Harmon-EPS (SPC de HIRLAM-ALADIN, grupo del que Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) forma parte), en el diseño de un SPC de alta resolución para tener en cuenta las tres fuentes de incertidumbre. En la Tabla 22.1 en la página siguiente se resumen los detalles técnicos de diversos SPC de alta resolución operativos o semi-operativos en Europa en 2018. Atendiendo a esta tabla, cabe resaltar dos detalles transversales en todos los SPC: abarcan un área pequeña y tienen una alta resolución horizontal, entre 2-3 km. Ambos detalles son significativos y condicionantes en su diseño.

**Áreas pequeñas.** Las áreas pequeñas van ligadas a resolver principalmente incertidumbres de carácter mesoescalar (en particular, escala meso- $\beta$ ) y de escala convectiva como, por ejemplo, convección diurna en las montañas y nieblas locales en los valles. Mientras que las incertidumbres de estructuras sinópticas generalmente no se generan y/o desarrollan dentro de esas áreas pequeñas y vienen dadas por las condiciones de contorno. Es decir, provienen de los modelos globales, o los SPC generados con éstos, en los que se anidan los SPC de alta resolución. Ejemplos para el  $\gamma$ SREPS

en la península ibérica podrían ser estructuras meteorológicas sinópticas como el Anticiclón de las Azores o una borrasca típica entrando por Galicia con frente frío asociado.

**Alta resolución horizontal entre 2-3 km.** Una resolución horizontal de la malla de los modelos por debajo de unos 4 km implica, como aspecto más destacable, que la convección o nubes de tormenta, desencadenadas por la llamada *inestabilidad convectiva*, son resueltas por la parte *dinámica* (sec. 10.4 en la página 135) de los modelos (esta característica se denomina *convection-permitting* en inglés), en vez de estar parametrizada dentro de la parte de las *parametrizaciones físicas* (sec. 10.5 en la página 137) del modelo. Siguiendo con el ejemplo del  $\gamma$ SREPS, la misma parte de los modelos que simula la evolución del Anticiclón de las Azores al sur y el paso de un frente frío de madrugada en Galicia, también deberá resolver la tormenta de tarde en el sistema Ibérico. Todo ello también implica que deben resolverse con más detalle otras parametrizaciones físicas de los modelos, donde destacan la *turbulencia* en la Capa Límite Planetaria (PBL) y la *microfísica* de nubes. Esta última, por ejemplo, se resuelve describiendo con sumo detalle la evolución de las gotitas de nube dentro de ella durante horas o días, creciendo hasta dar lluvia o evaporándose y deshaciéndose la nube.

Características / SPC Europeos	Modelo # miembros Área	Resolución Pasadas Alcance	Condiciones iniciales	Condiciones de contorno	Error del modelo
AEMET- γSREPS [España]	Multimodelo 20 400x1200 km	2,5 km x 65/72 00/12 UTC HH+48	Igual que de contorno → + LETKF 2018	5 GCM (~ 9-28 km) (*)	Multimodelo (***)
MetCoOp EPS [Noruega, Suecia y Finlandia]	HARMONIE- AROME 10 1900x2400 km	2,5 km x 65 00/06/12/18 UTC HH+48	3DVAR NMC + asimilación superficie	SLAF con ECHRES (~ 9 km) [GCM]	→ 2018 ¿pert. superficie? ¿SPPT?
AROME-EPS [Francia]	AROME 12 1900x2000 km	2,5 km x 90 09/21 UTC HH+45	3DVAR + pert. superficie → EDA 2018	PEARP (***) (~ 10 km) [SPC global]	SPPT (parametrización estocástica)
COSMO-DE- EPS [Alemania]	COSMO 20 1200x1300 km	2,8 km x 50 03/06/.../21 UTC HH+27/54	LETKF (KENDA) + pert. SST y humedad suelo	ICON-EU (~ 6.5 km) [SPC regional]	Multiparámetros (fijos)
COSMO-E [Suiza]	COSMO 21 1300x850 km	2,2 km x 60 00/12 UTC HH+120	LETKF (KENDA)	ECENS (~ 18 km) [SPC global]	SPPT (parametrización estocástica)
MOGREPS-UK [Reino Unido]	UM 12 1600x1650 km	2,2 km x 70 03/09/15/21 UTC HH+54	UKV análisis	MOGREPS-G (~ 20 km) [SPC global]	Multiparámetros (estocásticos)

Tabla 22.1: Resumen de características técnicas de seis SPC de alta resolución en Europa en 2018; (\*) IFS, ARPEGE, GSM, GFS y GEM; (\*\*) HARMONIE-AROME, ALARO, WRF-ARW y NMMB; (\*\*\*) agrupamiento.

Finalmente, debemos destacar que los modelos de alta resolución se benefician de unas condiciones de contorno inferiores (el «suelo» del modelo) descritas más detalladamente: las líneas de costa, los tipos de suelo con su vegetación y las zonas urbanas, la orografía, etcétera. Pueden simular, por tanto, con más detalle brisas marinas y de valle/montaña, nieblas, alto-cúmulos lenticulares de ondas de montaña, etc. Como ejem-

plo, se muestra en la Figura 22.6, parte izquierda, una orografía a 2,5 km donde podemos apreciar el detalle de los valles, desde el Valle del Ebro hasta los más intrincados valles de los Pirineos. Los diferentes tipos de suelo pueden ser examinados en la Figura 22.6, parte derecha: invitamos a localizar en píxeles negros las ciudades de Barcelona y Zaragoza.

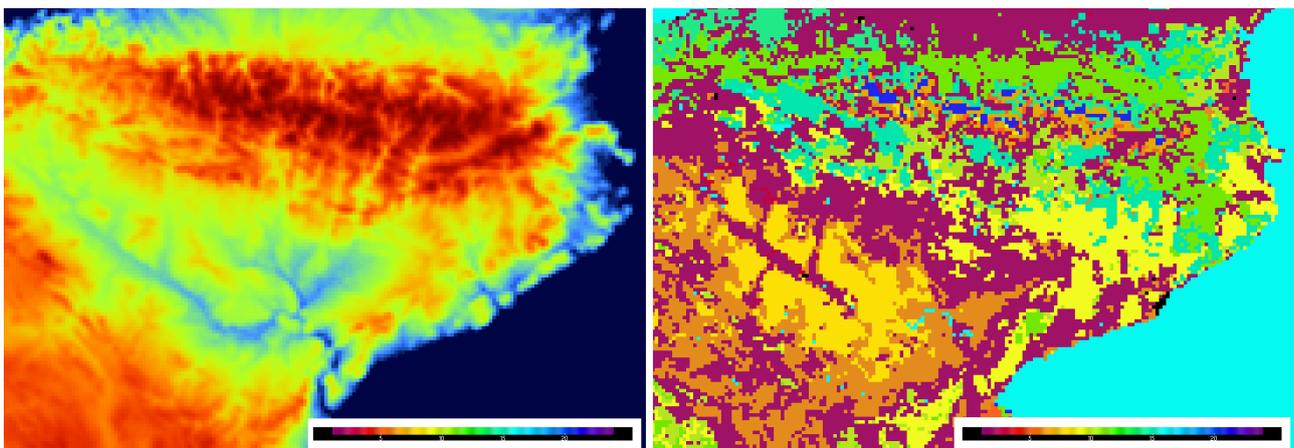


Figura 22.6: Condiciones de contorno inferiores del modelo WRF-ARW a 2,5 km de resolución (píxeles) en el nordeste de la península ibérica. Izquierda: orografía. Derecha: tipos de suelo: urbano (negro), cultivos (magentas, rojos y naranjas), pastos (marrón), matorrales o bosque ralo (amarillo), bosques (azul turquesa y verde) y agua (azul).

## 22.3 Objetivos del $\gamma$ SREPS

Hay dos objetivos principales. El primero, predecir *fenómenos meteorológicos adversos* (sec. 41.3 en la página 628) y/o extremos, tales como precipitaciones copiosas en el ámbito del Mediterráneo, que suelen producir inundaciones (cap. 32 en la página 531 y cap. 44 en la página 655). Un aviso oportuno en el sistema Metealerta (cap. 41 en la página 627) de AEMET puede salvar vidas y bienes.

**Fenómenos meteorológicos adversos (FMA).** Ocurre a menudo, sobre todo en el ámbito del mar Mediterráneo, que las evoluciones mesoescalares son decisivas para la génesis y evolución regional de los FMA, modulando ciertamente los forzamientos sinópticos más generales. Así, para simular las evoluciones mesoescalares, sobretodo con inestabilidad convectiva, son imprescindibles los *modelos de predicción del tiempo de alta resolución*. Y dada la baja predecibilidad de estos FMA, no se puede acometer su predicción si no es a través de un SPC de alta resolución.

El segundo objetivo es predecir *variables cotidianas de alto interés socioeconómico* con alta fiabilidad y detalle. Ejemplos: temperaturas máximas y mínimas en localidades; viento en aeropuertos (condicionan la operatividad de despegues y aterrizajes); en energías renovables, viento en parques eólicos, radiación solar para parques fotovoltaicos y de concentración (térmica), en ambos casos para anticipar la producción de energía eléctrica, etc.

## 22.4 Fase de diseño

### 22.4.1 Incertidumbre en condiciones iniciales

Este aspecto de la fase de diseño se aborda en detalle en el capítulo 16 en la página 243.

### 22.4.2 Incertidumbre en condiciones de contorno: Multicondiciones de contorno

El objetivo final de un SPC de alta resolución es proporcionar los mejores productos posibles para realizar las mejores predicciones que permitan, a su vez, tomar las mejores decisiones a los usuarios finales. Todo se consigue proporcionando la mejor predicción posible de la incertidumbre en la propia predicción, estimándola y acotándola: *prediciendo la predecibilidad*. Para un SPC de alta resolución de área limitada se necesitan diversas condiciones de contorno (CC), tantas como miembros. Cuanto mejor se describan las *incertidumbres sinópticas* a través de esas condiciones, mejor será el SPC generado. Una de las posibilidades más utilizadas es anidar un SPC de alta resolución dentro de un SPC global. En otras palabras, un miembro del SPC global proporciona las CC a un miembro de un SPC de alta resolución. En el capítulo 18 en la página 275 se muestra que ninguno de los SPC globales estudiados proporciona suficiente incertidumbre sinóptica en las CC.

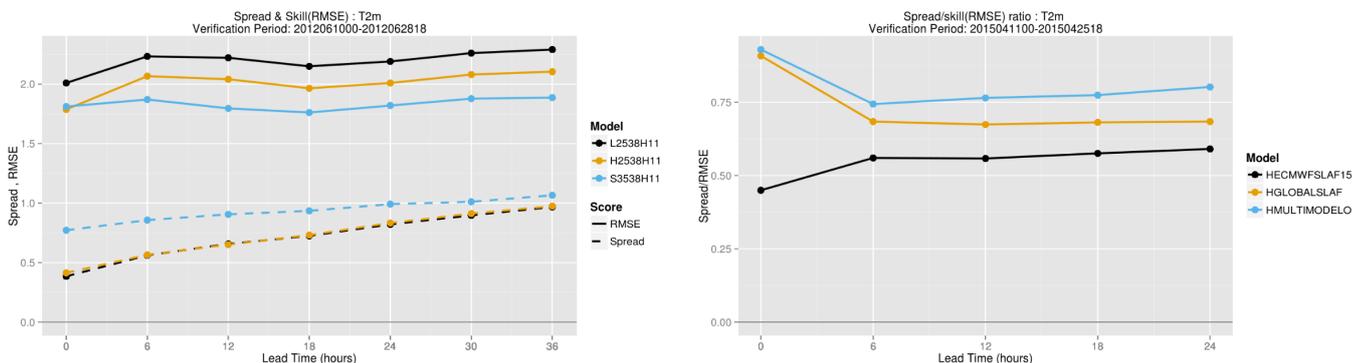


Figura 22.7: Evolución con el alcance predictivo de dispersión (desviación típica) y error (RMSE del promedio) de la temperatura de garita meteorológica (a 2 metros) prevista por diferentes SPC, todos con 22 miembros y con un único modelo, HARMONIE-AROME, pero diferentes estrategias de condiciones de contorno. Izquierda: dispersión (línea continua) y error (discontinua), comparando ECENS a 32 km (negro), ECENS a 16 km (naranja) y SLAF con ECHRES a 16 km (azul). Derecha: proporción dispersión/error, comparando SLAF con ECHRES a 16 km (negro), multicondiciones de contorno con los 5 modelos globales del  $\gamma$ SREPS (azul) y combinación de las dos estrategias anteriores (naranja).

Pero, en el mismo capítulo (sec. 18.5 en la página 285), se muestra que combinando cada uno de los diferentes modelos globales, es decir, *multicondiciones de contorno*, sí que se describe consistentemente la incertidumbre en las condiciones de contorno. La idea subyacente es que cada modelo global determinista distinto proporcione las condiciones de contorno para cada uno de los miembros de un SPC de alta resolución.

¿Por qué multicondiciones de contorno en el  $\gamma$ SREPS? Porque son las que experimentalmente (i. e. en la práctica) describen mejor, de largo, las incertidumbres sinópticas a través de las condiciones de contorno. Lo mostramos en dos pasos en la Figura 22.7 en la página anterior verificando la variable de temperatura a 2 metros del suelo contra la observada en la garita meteorológica. En la parte superior se puede apreciar que el SLAF con ECHRES o IFS del ECMWF (azul) es mejor que el ECENS a 16 km (naranja), al estar las dos curvas más cercanas (cap. 15 en la página 207). En la parte inferior vemos que multicondiciones de contorno (azul) es mejor que SLAF con ECHRES (negro), al ser la razón dispersión/error más cercana a 1 (sec. 15.8.2 en la página 223).

**Scaled Lagged Average Forecast (SLAF) [3]** (sec. 13.5 en la página 174). Técnica para utilizar las diferentes pasadas de un modelo global para generar las condiciones de contorno de un SPC de más alta resolución. Tiene dos ventajas sumamente apreciables: mejor resolución horizontal de un modelo global respecto a un SPC global y barato computacionalmente, pues se reduce en más de un factor 10 la cantidad de datos. Se basa en añadir o sustraer a la condición de contorno de la última pasada, escalada por un factor  $k$ , la diferencia de ésta con la de una pasada anterior válida a la misma hora:

$$BC_{SLAF} = FC_{ref} \pm K_n(FC_{ref} - FC_{HH}) \quad (22.1)$$

Por ejemplo, las condiciones de contorno para dos miembros en un alcance HH=24 desde las 00 UTC a partir de dos pasadas globales a las 12 UTC y las 00 UTC del día anterior:

$$\begin{aligned} BC_1 &= FC_{ref}^{12+24} + 0,75(FC_{ref}^{12+24} - FC_{HH}^{00+36}) \\ BC_2 &= FC_{ref}^{12+24} - 0,75(FC_{ref}^{12+24} - FC_{HH}^{00+36}) \end{aligned} \quad (22.2)$$

En conclusión, la estrategia de multicondiciones de contorno del  $\gamma$ SREPS hasta el momento se ha demostrado mejor que cualquier otra técnica, especialmente respecto a utilizar un SPC global como condiciones de contorno tal como el ECENS o SPC global del ECMWF.

### 22.4.3 Incertidumbre asociada a los errores del modelo: Multimodelo

Ya sabemos (sec. 13.5 en la página 174 y cap. 17 en la página 257) que los modelos no son perfectos y que para el diseño de un SPC consistente se deben de tener en cuenta, en la medida de lo posible, los errores e incertidumbres inherentes dentro de los modelos. ¿Por qué *multimodelo* para tener en cuenta los errores del modelo? Porque es la técnica que experimentalmente (i. e. en la práctica) describe mejor las incertidumbres mesoescalares y, por ende, la escala convectiva de los modelos en el entorno de un SPC. Es decir, las diferencias intrínsecas en el diseño de cada modelo proporcionan unas predicciones ligeramente diferentes que describen adecuadamente su incertidumbre inherente y compensar dentro del SPC, como conjunto, los distintos errores de cada uno de los modelos. A estas diferencias de diseño entre los modelos hace referencia precisamente la cita del meteorólogo EDWARD LORENZ que encabeza este capítulo.

Veamos un ejemplo de esos resultados experimentales. Nos centraremos en el episodio sucedido en Málaga el 28 de septiembre de 2012, que se trató de un fenómeno meteorológico adverso de precipitación muy intensa. Aunque sólo es un caso y de él no se pueden tomar conclusiones estadísticamente significativas, es un primer paso en la evaluación del sistema. Ese día una profunda y activa borrasca en altura pasó por el sur peninsular produciendo precipitaciones intensas con inundaciones en Málaga. Se registraron 85,4 mm / 1 hora en Álora (Las pelonas) y 227,0 mm / 12 horas en Alpendeire (AEMET). Mostramos aquí las verificaciones de la temperatura a dos metros en las Figuras 22.8 en la página siguiente y 22.9 en la página siguiente, correspondientes a ese caso y no la verificación de la precipitación que no es tan fácilmente interpretable.

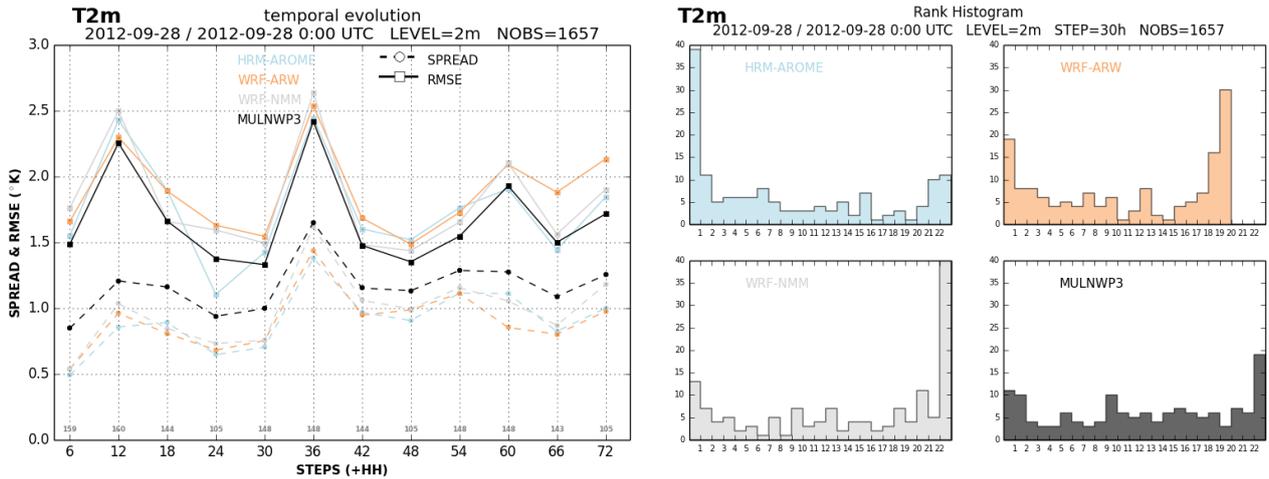


Figura 22.8: Evolución con el alcance predictivo de la dispersión y el error (izquierda) e histograma de rango (derecha) para la temperatura a 2 metros de cuatro SPC: multimodelo de tres modelos (negro) y 3 SPC monomodelo con cada modelo del multimodelo: HARMONIE-AROME (azul), WRF-ARW (rojo) y NMM (gris).

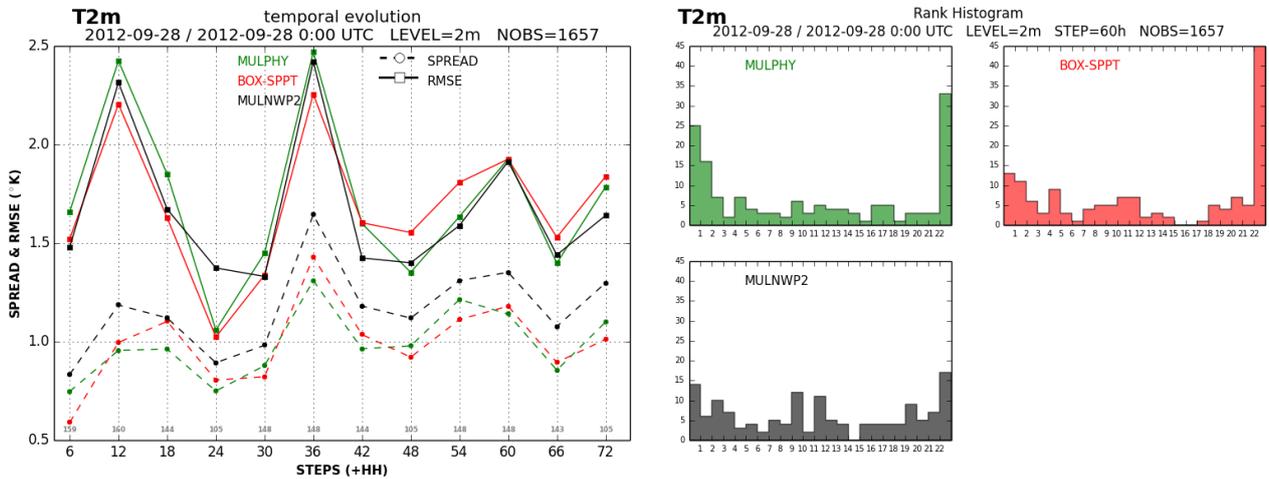


Figura 22.9: Como en la Figura 22.8 ahora para estos tres SPC: multimodelo con dos modelos (negro), multifísica (verde) y con la parametrización estocástica SPPT (rojo).

En la primera (Figura 22.8) se comparan 4 SPC: uno con la técnica multimodelo con tres modelos (trimodelo) y el resto de SPC con un sólo modelo (monomodelo), pero cada uno de los SPC con uno de los modelos que han conformado el SPC multimodelo. En la segunda (Figura 22.9) se compara un SPC multimodelo de dos modelos (bi-modelo) con otros dos SPC de un solo Modelo (monomodelos) pero que utilizan otras dos técnicas para tener en cuenta el error del modelo: uno con multifísica de dos físicas (bi-física) y el otro con la parametrización estocástica SPPT [17] (cap. 17 en la página 257). En todos los experimentos de ambas figuras, los SPC tienen configuraciones parejas, en todo lo que no tiene que ver con el error de los modelos, para que las comparaciones sean limpias: 22 miembros cada uno, mismas condiciones de contorno

del ECENS, etc.

En la Figura 22.8 se comprueba que el SPC multimodelo (negro) obtiene mejores resultados que cualquier SPC monomodelo de los modelos que lo componen: HARMONIE-AROME (azul), WRF-ARW (rojo) y NMM (gris). El SPC multimodelo, muestra mayor consistencia con las observaciones porque en el diagrama de evolución de dispersión y error las curvas negras están más próximas entre ellas y la dispersión tiene valores más altos (línea negra discontinua). En el histograma de rango la lectura es similar porque en conjunto las barras negras forman una figura mucho más plana (sec. 15.8.1 en la página 222).

Y en la Figura 22.9 se comprueba también que el SPC multimodelo (negro) obtiene mejores resultados que

cualquiera de las otras dos técnicas de **SPC** para tener en cuenta el error del modelo. La interpretación de las gráficas es igual a la anterior: líneas negras más próximas con más dispersión en el diagrama de evolución de dispersión y error y, por otro lado, la silueta de las barras más plana en conjunto en el histograma de rango. Tan sólo señalar que la conclusión de diseñar un **SPC** multicondiciones de contorno y multimodelo para el  $\gamma$ SREPS en la mesoescala y la escala convectiva porque son las que prometen los mejores resultados, es la misma a la que se llegó que se llegó en el diseño de su predecesor el AEMET-SREPS, por las mismas razones con unos resultados muy similares a los expuestos aquí (sec. 21.4 en la página 322 y sec. 21.5.1 en la página 325).

#### 22.4.4 Incertidumbre asociada a los campos de suelo y/o superficie

ALBERTO MARTÍN GARCÍA  
Area de Innovación, **AEMET**

En el estudio de la incertidumbre asociada a las parametrizaciones físicas del modelo, desde hace pocos años, está ganando fuerza el análisis y la comprensión de los procesos físicos que tienen lugar en el suelo, ya sea éste considerado tierra firme o como una extensión acuosa de agua dulce (ríos y lagos) o de agua salada

(mares y océanos). Estos procesos físicos transfieren una cierta cantidad de energía a las capas superiores de la atmósfera. Esta energía, a su vez, juega un papel determinante en alimentar procesos como el de la convección facilitando, por tanto, el desarrollo y crecimiento de la nubosidad y desembocando, cuando las condiciones del entorno sean favorables, en la generación de tormentas.

Para entender y cuantificar la incertidumbre asociada a los procesos físicos que tienen lugar tanto a nivel de suelo como en su interior (subsuelo), se recurre a una metodología basada en perturbar de forma aleatoria (estocástica) algunas de las variables que intervienen en dichos procesos. Estas perturbaciones se pueden introducir en los modelos de manera individual (perturbando una única variable) o de forma colectiva (perturbando un conjunto de variables) con el propósito de entender sus interacciones y su posterior efecto en un campo tan determinante para la sociedad como es el de la precipitación. Como ejemplo de perturbación de los campos de suelo o de superficie, en la Figura 22.10 se muestra el campo de la temperatura de la superficie del mar en el análisis de un modelo meteorológico, una vez ha sido dicho campo perturbado de forma estocástica para cada uno de los miembros que integran un sistema de predicción por conjuntos (**SPC**).

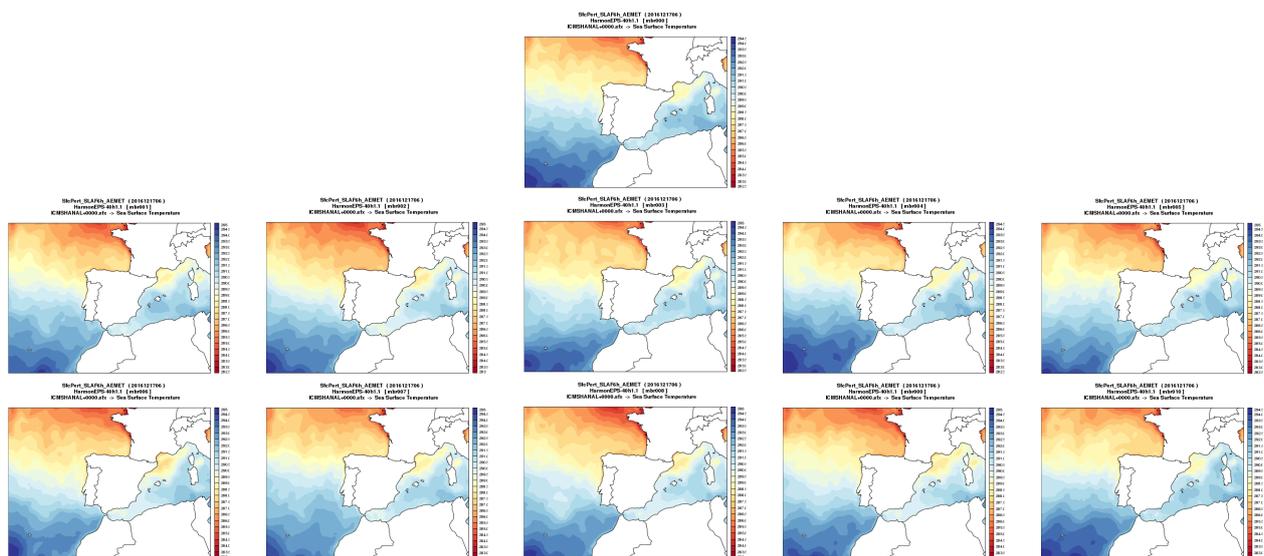


Figura 22.10: Análisis del modelo meteorológico de alta resolución *Harmonie-40h1.1* donde se muestra, para cada miembro de un **SPC**, el campo de la temperatura de la superficie del mar una vez perturbado de forma estocástica. La imagen que encabeza la figura se corresponde con el análisis del miembro de control (no perturbado).

Se puede observar cómo varía el gradiente de temperatura a lo largo de la costa atlántica de Francia, de la península ibérica y sobre el Mediterráneo occidental, entre los diferentes miembros del sistema de predicción por conjuntos.

Como se ha indicado previamente, para cada uno de los miembros del SPC mostrado en la Figura 22.10, se perturba la temperatura de la superficie del mar aplicando, sobre dicho campo, un patrón de perturbación que ha sido generado previamente de manera estocástica. En la Figura 22.11, arriba, se representa

la estructura del patrón de perturbación con el que se perturba a una muestra del SPC. Obsérvense las diferencias existentes en dicho patrón entre los miembros representados. La Figura 22.11, abajo, representa una muestra formada por 4 miembros del SPC que se representaba en la Figura 22.10. Puede apreciarse el efecto que la perturbación de la temperatura de la superficie del mar ejerce sobre el campo de la precipitación predicha por el modelo. Puede observarse cómo varían, en el campo de precipitación, la estructura, la localización y la cantidad de precipitación prevista entre los diferentes miembros del SPC mostrados.

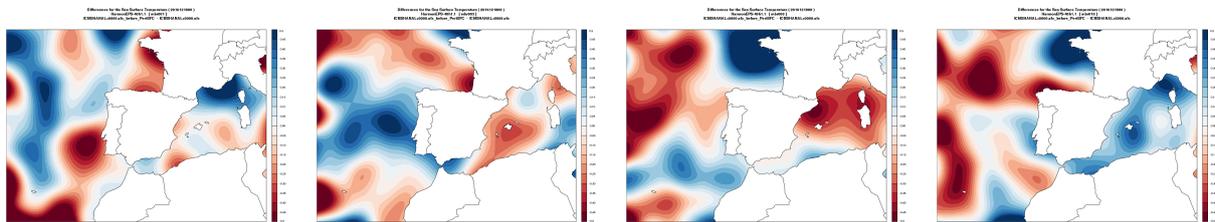
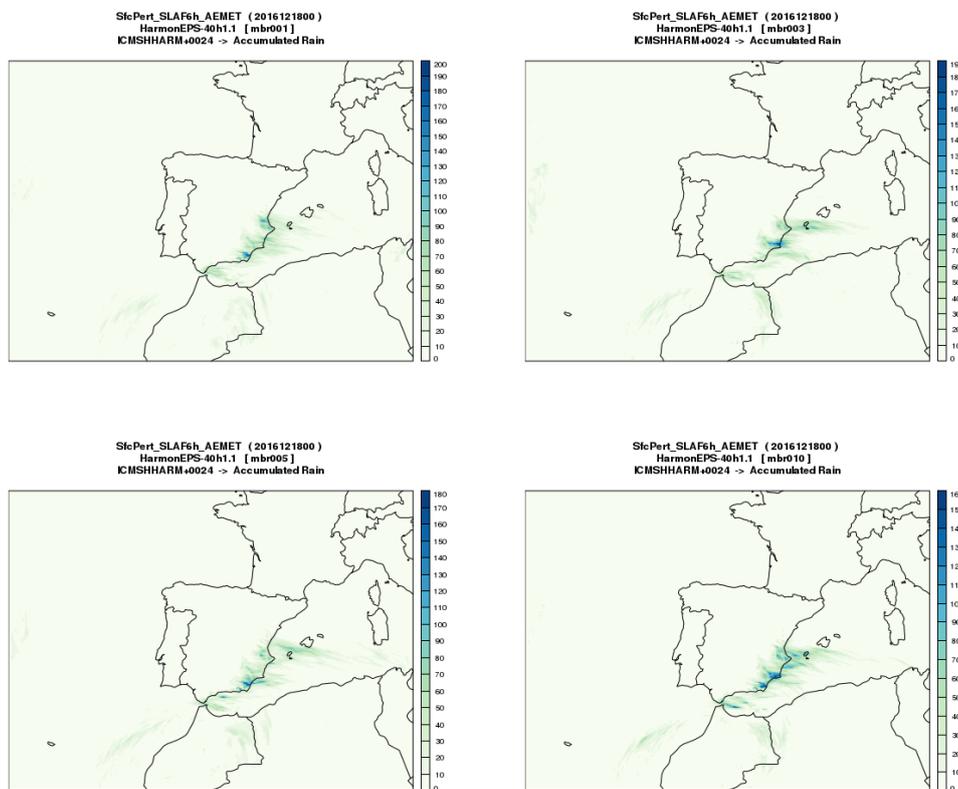


Figura 22.11: Arriba: patrón de perturbación generado de forma estocástica (aleatoria) para varios miembros de un SPC. Abajo: campo de precipitación acumulada en 24 h predicho por el modelo meteorológico de alta resolución Harmonie-40h1.1 para varios miembros de un SPC.



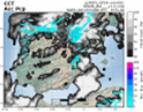
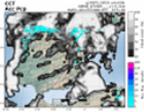
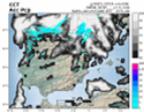
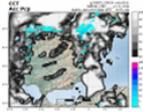
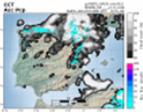
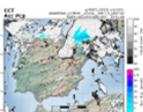
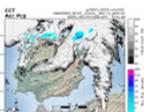
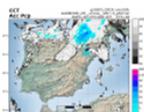
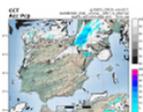
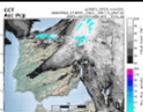
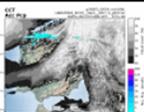
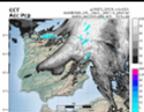
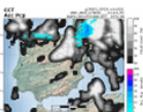
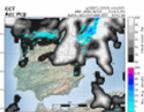
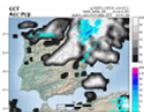
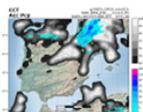
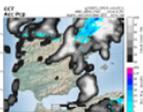
Multi-BCs	ECMWF / IFS	NCEP / GFS	MF / ARPÈGE	JMA / GSM	CMC / GEM
Multi-NWP					
HARMONIE-AROME 					
HARMONIE-ALARO 					
WRF ARW 					
NMMB 					

Tabla 22.2: Los 20 miembros del  $\gamma$ SREPS. Un miembro es generado con una condición de contorno y un modelo. La condición de contorno, una de las 5 columnas de los 5 modelos globales. El modelo, una de las 4 filas de los 4 modelos de predicción del tiempo de alta resolución. Por ejemplo, la última celda (la de más abajo y más a la derecha) es el miembro simulado por el modelo NMMB con las condiciones de contorno del CMC/GEM.

## 22.5 Características de AEMET- $\gamma$ SREPS

El AEMET- $\gamma$ SREPS es un SPC de 20 miembros de alta resolución a 2,5 km, no hidrostático (sec. 6.3.2 en la página 78), convection-permitting, multicondiciones de contorno y multimodelo. Desde Abril de 2016 se integra dos veces al día, a las 00 y a las 12 UTC, hasta un alcance predictivo de 36 horas. Es el SPC heredero del clásico AEMET-SREPS [4] (cap. 21 en la página 313) con un diseño acorde con la finalidad de ser la herramienta para tener en cuenta las incertidumbres en la predicción operativa de corto plazo en AEMET (sec. 4.2.2 en la página 32), cuantificando la predecibilidad. En el diseño del  $\gamma$ SREPS se tienen en cuenta las tres diferentes fuentes de incertidumbre de la siguiente manera (ver características en negrita en la Figura 22.5 en la página 338).

### 22.5.1 Incertidumbre en condiciones iniciales

Se utiliza la misma estrategia que en las condiciones de contorno: *multicondiciones iniciales*. La incertidumbre se tiene en cuenta a través de las diferencias de los análisis que de manera independiente se han

realizado en 5 centros punteros a nivel mundial. Al escribir estas líneas, se pretende ya en 2018 substituirlo con una asimilación propia de observaciones mediante el método LETKF (sec. 16.2.2 en la página 246).

### 22.5.2 Incertidumbre en las condiciones de contorno

La incertidumbre de escala sinóptica entra a través de los cuatro bordes de los 4 modelos del  $\gamma$ SREPS a través de las predicciones de los 5 modelos globales deterministas de 5 centros independientes, es decir, *multicondiciones de contorno*:

- Del IFS (o ECHRES) del ECMWF o Centro Europeo a plazo medio (<https://www.ecmwf.int>).
- Del ARPÈGE de MétéoFrance (<http://www.meteofrance.fr>).
- Del GFS del NCEP de USA (<http://www.ncep.noaa.gov>).
- Del GSM del JMA o del Servicio Meteorológico Japonés (<http://www.jma.go.jp>).
- Del GEM del CMC o del Centro Meteorológico Canadiense (<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/science-technology/centres/quebec.html#cmc>).

### 22.5.3 Incertidumbre en los modelos

Se evalúan con la técnica multimodelo (cap. 17 en la página 257), es decir, con 4 modelos de alta resolución desarrollados independientemente. Se espera que las diferencias entre ellos contengan gran parte de las incertidumbres inherentes dentro de ellos mismos. Los 4 modelos utilizados son:

- HARMONIE-AROME de HIRLAM o Hirlam Aladin Regional/Meso-scale Operational NWP In Europe de High Resolution Limited Area Model [1] (<http://hirlam.org> y [HTTP://HIRLAM.ORG/INDEX.PHP/HIRLAM-PROGRAMME-53/GENERAL-MODEL-DESCRIPTION/MESOSCALE-HARMONIE](http://HIRLAM.ORG/INDEX.PHP/HIRLAM-PROGRAMME-53/GENERAL-MODEL-DESCRIPTION/MESOSCALE-HARMONIE), sec. 20.4 en la página 310).
- HARMONIE-ALARO de ALADIN o ALadinAROMe de Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International [20] (<http://www.>

[umr-cnrm.fr/aladin/spip.php?article129](http://umr-cnrm.fr/aladin/spip.php?article129)).

- WRF-ARW del NCAR o Weather Research and Forecasting, Advanced Research WRF (NCAR) dynamical core del National Center for Atmospheric Research [18, 19] (<https://ncar.ucar.edu> y <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>).
- NMMB del NCEP o Non-hydrostatic Multi-scale Model on a B grid del National Centers for Environmental Prediction [8] (<https://dtcenter.org/nems-nmmb/users/index.php>).

En la Tabla 22.2 en la página anterior, podemos observar los 20 miembros o 20 simulaciones ligeramente diferentes, pero todas consideradas igualmente plausibles, que componen el  $\gamma$ SREPS. Los 20 miembros se generan al cruzar las 5 condiciones de contorno de 5 modelos globales (multicondiciones de contorno) con los 4 modelos (multimodelo).

En el diseño del  $\gamma$ SREPS y, debido a que su naturaleza multimodelo, ha imperado la premisa de integrar los cuatro modelos bajo las condiciones más parecidas posibles para no beneficiar uno frente a otro y descom-

pensar el SPC. Bajo esta filosofía, se han configurado todos los modelos de manera equiparable. Por ejemplo, con mallas o rejillas horizontales (*grids* en inglés) y niveles verticales lo más equivalentes posible.

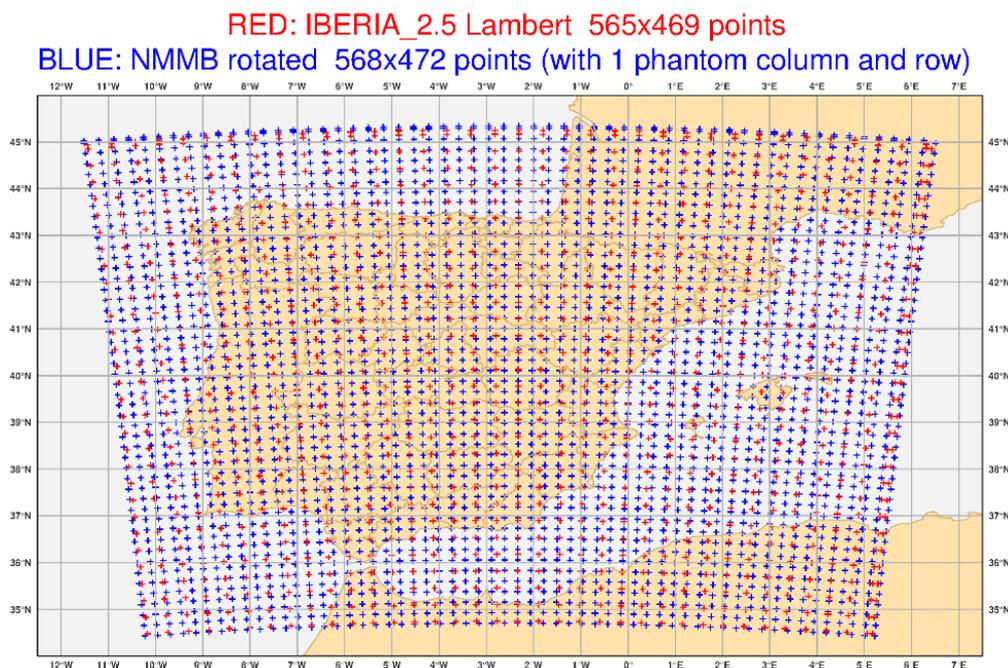


Figura 22.12: Malla o grid horizontal del  $\gamma$ SREPS denominada IBERIA\_2.5. En cruces rojas, la proyección Lambert Conformal Conic de los Modelos HARMONIE-AROME, ALARO y WRF-ARW y, en las azules, la malla de la proyección Latitud-Longitud Regular Rotada del NMMB. Se representan solamente 1 de cada 15 puntos.

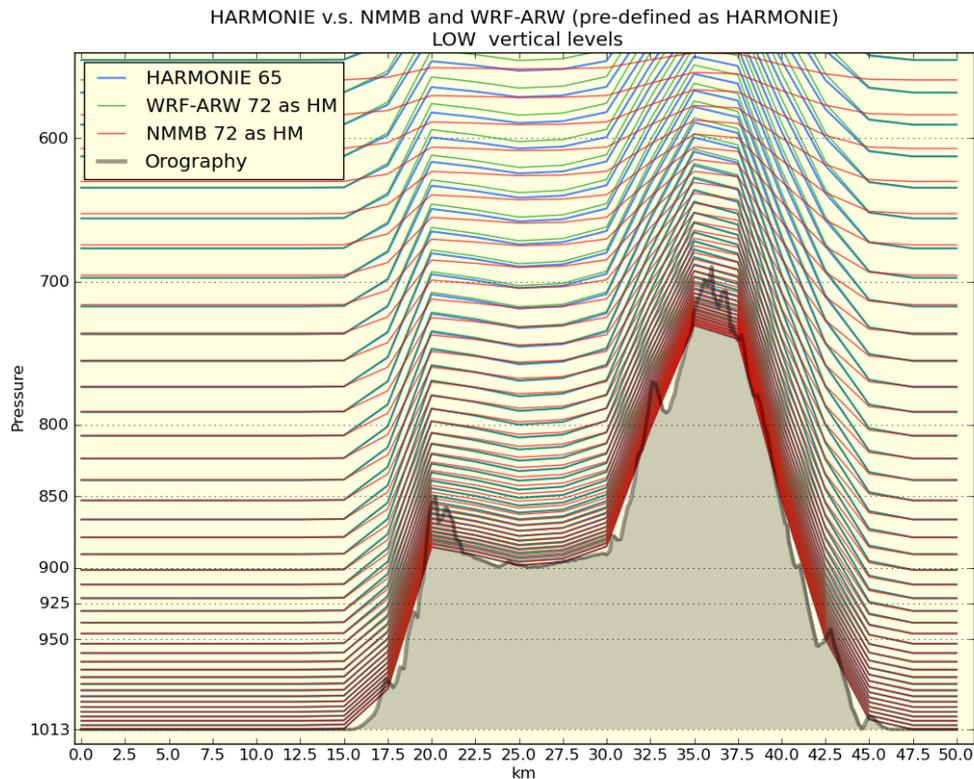


Figura 22.13: Las tres distribuciones de niveles verticales utilizados en los 4 modelos del  $\gamma$ SREPS: 65 niveles verticales híbridos de sigma-presión para AROME y ALARO (HARMONIE en azul), 72 niveles sigma para WRF-ARW y 72 híbridos sigma-presión para el NMMB.

**NMMB: de la proyección Longitud-Latitud Regular Rotada a la Lambert.** Si se ha observado atentamente la Tabla 22.2 en la página 345 puede haberse notado que el modelo NMMB tiene dos puntos más de malla. ¿Por qué? En realidad, se pone un punto de malla o rejilla más todo alrededor del área del NMMB, porque la salida del  $\gamma$ SREPS de todos y cada uno de los miembros está codificada exactamente igual en un formato llamado GRIB1 y, para poder hacer realmente homogénea esta codificación, debe hacerse que los datos de todos los miembros estén en la misma proyección Lambert Conformal Conic. Al estar los datos del modelo NMMB Latitud-Longitud Regular Rotada, deben interpolarse a la proyección Lambert. Para interpolar sin introducir ruido en los datos es preciso tener puntos alrededor, por los que se incluye en los bordes del área del NMMB ese punto de más.

#### 22.5.4 Mallas horizontales

Tres de los modelos, a saber, HARMONIE-AROME, ALARO y WRF-ARW tienen configurada exactamente la misma rejilla de la misma proyección horizontal (ver Tabla 22.2 en la página 345): la *Lambert Con-*

*formal Conic.* El Modelo NMMB tiene una rejilla de Latitud-Longitud Regular Rotada (táctica de modelización consistente en hacer que el ecuador pasa por el centro de la malla, consiguiendo así tener una malla muy regular en latitudes medias). Ambas mallas, como puede observarse en la Figura 22.12 en la página anterior, tienen una distribución muy similar, con casi exactamente los mismos números de puntos, 565x469, con la misma separación entre ellos de 2,5 km.

#### 22.5.5 Niveles verticales

Para que la simulación en los 4 modelos de la parte más baja de la atmósfera, correspondiente a la PBL (sec. 10.5 en la página 137), sea consistente entre todos los modelos, sin ventajas de unos respecto a otros, se han distribuido los niveles verticales de manera equiparable con unos espesores entre ellos muy similares: mismo número de niveles verticales hasta 850 hPa con un espesor casi equivalente. Todo ello se pone de relieve en la Figura 22.13, donde se puede apreciar que casi no hay diferencias en las zonas sin relieve, pero si las hay en las zonas montañosas. Estas discrepancias son insalvables debido a las distintas

definiciones subyacentes de los niveles verticales en los modelos.

**Los 72 niveles verticales en los WRF-ARW y NMMB versus los 65 en los HARMONIE.** Nótese que tanto WRF-ARW como NMMB se integran con 72 niveles verticales, 7 más que los 65 de los modelos HARMONIE (AROME y ALARO). Ésto es debido a que los dos primeros tienen un tope en la atmósfera que simulan en 40 hPa. Los segundos no lo tienen. En ese tope o tapa que se pone al modelo, o cerca de él, se pueden generar en las simulaciones evoluciones atmosféricas *espurias* (no reales), como por ejemplo ondas de gravedad, que podrían entorpecer la simulación de toda la atmósfera del modelo. De modo que recurrimos a otra táctica habitual en modelización: acumulando (aumentando y apretando) más niveles verticales al acercarse a ese tope, tal como si estuviéramos en los niveles bajos al acercarnos a la superficie, se aminoran ostensiblemente esos efectos no deseados. En el  $\gamma$ SREPS se consigue poniendo esos 7 niveles verticales de más en el WRF y el NMMB.

### 22.5.6 Configuraciones de los modelos

En la Tabla 22.3 se muestran las características y configuraciones de los 4 modelos utilizados. Nótese que tal como expone E. N. LORENZ en la cita de cabecera del capítulo, cada modelo tiene una naturaleza diferente, es decir, tienen diseños de base variopintos. Pero como se señalaba en el apartado anterior, probablemente en esas diferencias reside la fuerza del multimodelo.

### 22.5.7 Resolución de las condiciones de contorno

Otro aspecto de capital importancia en el diseño del  $\gamma$ SREPS es tener la mejor resolución horizontal y vertical posible en las condiciones de contorno que provienen de los 5 modelos globales. Cuanto menor sea el salto de resolución entre un modelo global a uno de alta resolución, mejor será la simulación. En la Tabla 22.4 en la página siguiente se muestran las resoluciones de los modelos globales disponibles para el  $\gamma$ SREPS frente a la resolución real en la que se integran. Y el objetivo es ese, disponer de la resolución más próxima posible a la real de los modelos globales como condiciones de contorno.

### 22.5.8 Parametrizaciones

Para los procesos de subgrid o submalla, es decir, las parametrizaciones de la parte de la física de los modelos, como la radiación, la microfísica de nubes (evolución de las nubes), la turbulencia en la PBL, el suelo, etc. se han utilizado en cada modelo aquellas combinaciones diseñadas específicamente para simulaciones de alta resolución *convection-permitting* desde 1 a 4 km. También ha imperado la búsqueda de la coherencia entre los distintos modelos: por ejemplo, se actualiza la entrada de energía de los modelos, es decir, la radiación solar (radiación de onda corta) con la misma cadencia, concretamente cada 15 minutos, en todos ellos.

Modelo / características	HARMONIE		WRF-ARW	NMMB
	AROME	ALARO		
Dinámica y Física	Física AROME	Física ALARO con convección 3MT en la dinámica	Núcleo dinámico ARW Física 3 km	Dinámica NNM Física NMMB
Paso de tiempo	60 segundos (espectral y semi-lagrangiano)		12 segundos (Euleriano)	5 625 segundos (euleriano)
Niveles verticales	65 híbridos sigma-presión		72 sigma Tope atmósfera 40 hPa	72 híbridos sigma-presión hasta 40 hPa
Proyección / Malla o grid horizontal	Lambert Conformal Conic Centro en 2.5°O / 40°N (IBERIA_2.5) grid arakawa A 565x469			Regular lat-lon rotada Centro 2.5° W / 40° N grid arakawa B 567x471
CC	8 puntos de relajación en las condiciones de contorno			

Tabla 22.3: Resumen de las características y configuraciones más generales de los 4 modelos de alta resolución del  $\gamma$ SREPS.

Condición de contorno	modelo global original		Del modelo global a $\gamma$ SREPS	
Centro / modelo	Resolución horizontal (km)	Número niveles verticales y tipo	Resolución horizontal (km)	Número niveles verticales y tipo
ECMWF / IFS	11	137 híbrido	11	137 híbrido
NCEP /GFS	13	64 sigma	26	32 isobárico
MétéoFrance / ARPÈGE	7	105 híbrido	10	60 híbrido
CMC / GEM	25	80 híbrido	25	47 híbrido
JMA / GSM	20	100 híbrido	20	86 híbrido

Tabla 22.4: Resoluciones horizontales y número de niveles verticales de las 5 condiciones de contorno del  $\gamma$ SREPS respecto a la resolución original de los modelos globales.

## 22.6 Evolución y futuro

ALFONS CALLADO I PALLARÉS Y DAVID GIL OLIVA

*Delegación Territorial en Cataluña, AEMET*

En un mundo en plena revolución tecnológica y de continuos avances, el  $\gamma$ SREPS no podía ser menos. Los SPC de alta resolución van incorporando continuamente los últimos avances en las técnicas para generarlos y en sus modelos. A continuación se listan las evoluciones previstas en el  $\gamma$ SREPS en el momento de escribir estas líneas:

- **Asimilación.** Incorporación de un sistema de asimilación propio, basado en LETKF (sec. 16.2.2 en la página 246) o en su defecto en 3DVAR (sec. 16.2.3 en la página 247), asimilando observaciones de alta resolución convencionales, de satélites y sobretodo de radares.
- **Ciclos cada 3 horas.** Un objetivo futuro del  $\gamma$ SREPS es la predicción a muy corto plazo, es decir, las primeras 12-24 horas. Así se integrarán los ciclos intermedios, a saber, 03, 05, 09, 15, 18 y 21 UTC, a unas 12 horas para las predicciones a muy corto plazo y salidas muy frecuentes (15 minutos de dos puntos más abajo).
- **Incremento del alcance.** Se integrarían los ciclos principales de las 00 UTC y las 12 UTC a 3 días (72 horas), cubriendo todo el corto plazo operativo en AEMET.
- **Salidas cada 1 hora y cada 15 minutos para campos relevantes.** La salida del  $\gamma$ SREPS es cada 3 horas y se va a incrementar a 1 hora, suficiente para la mayoría de tareas de verificación (cap. 15 en la página 207) y de productos generales de predicción. Pero hay campos que por su relevancia y/o utilidad van a tener una salida cada 15 minutos. Ejemplos son: el viento a 10/80/100/120 metros en

parques eólicos, la radiación solar con la GHI para parques de energía fotovoltaica y la DNI para los de concentración, etc.

- **Área más grande: IBERIA\_2.5XL.** El área de integración del  $\gamma$ SREPS, llamada IBERIA\_2.5, cubre poco más que la península ibérica, lo que limita desarrollos meteorológicos sinópticos e incluso mesoescales, dando una preponderancia muy grande a partir de unas 12-18 horas de integración a las condiciones de contorno. El  $\gamma$ SREPS se convierte, en cierto modo, en un zoom o downscaling dinámico de los modelos globales. La idea es incrementar el área de IBERIA\_2.5 a IBERIA\_2.5XL, es decir, de 565x469 puntos de rejilla a 1152x864 o de 1400x1200 km a 2900x2200 km, retrasando el efecto de zoom dinámico hasta unas 24-36 horas y de paso dando más peso a la asimilación en las condiciones iniciales.
- **Incrementar a 25 miembros: el GEM-LAM.** Para describir mejor las probabilidades y tener más posibilidades de captar fenómenos adversos, se debe incrementar el número de miembros: se genera una PDF más detallada en el espacio de probabilidades (cap. 12 en la página 155). Y, por consistencia, coherencia y la simetría condiciones de contorno – modelos alta resolución, incluir en el  $\gamma$ SREPS el modelo de alta resolución canadiense GEM-LAM que se correspondería a las condiciones de contorno del CMC/GEM.
- **Incluir la parametrización estocástica SPPT.** En algunos casos de eventos de precipitaciones intensas, la parametrización estocástica SPPT para tener en cuenta los errores del modelo (cap. 17 en la página 257) ha dado excelentes resultados (véase, por ejemplo, en la Figura 22.9 en la página 342, que hasta el alcance de 36 horas la SPPT verifica casi tan bien como el multimodelo). Se planea estudiar la combinación de la SPPT con el multimodelo.

- **Más campos posprocesados.** Inclusión de una serie de campos posprocesados por lo modelos de especial interés, sobre todo para su uso en predicción operativa: **convective available potential energy (CAPE)**, **convective inhibition (CIN)**, pseudo-imágenes de reflectividad radar, pseudo-imágenes de satélite, visibilidad y/o niebla, rayos, temperaturas máximas y mínimas de garita a 2 metros, rachas máximas de viento, etcétera.

**Campos posprocesados.** Se trata de campos no disponibles directamente en el modelo, pero que se pueden *diagnosticar* (es decir, calcular después) con campos disponibles en el mismo, normalmente haciendo uso de sus niveles verticales naturales.

**Pseudo-imágenes.** Imágenes generadas a partir de las salidas de los modelos numéricos que reproducen (aparentemente, imitan) las imágenes que serían captadas por satélites y radares en la situación meteorológica simulada.

- **Calibración.** Calibrar la salida de tres campos meteorológicos de especial relevancia socioeconómica: la temperatura de garita a 2 metros, el viento de anemómetro a 10 metros y la precipitación acumulada. Se utilizarán métodos convencionales de calibración (sec. 22.9 en la página 357) y métodos de **aprendizaje automático (AA)** (sec. 14.2 en la

página 198).

- **Actualización modelos.** Cada nueva versión de los modelos de predicción del tiempo incluyen mejoras de las que se benefician los **SPC** en su conjunto. La actualización del  $\gamma$ SREPS viene dada en el momento de actualizar los modelos que lo componen cada vez que hay una nueva versión estable. Por ejemplo, al escribir estas líneas se está actualizando el WRF-ARW de la versión 3.6.0 a la 3.9.1.1, que como mejora más significativa incluye una mejor descripción de los niveles verticales. Se abandonan los niveles sigma para dar paso a los mejores niveles híbridos de sigma-presión.
- **Presentación de los productos en una página web interactiva.** Desarrollo y evolución del actual portal web incluyendo más productos del  $\gamma$ SREPS en mapas interactivos como herramienta esencial para predicción operativa en **AEMET** en el corto plazo e incluso para *nowcasting* (predicción a muy corto plazo). La interactividad básica comprende, por ejemplo, seleccionar un tipo de producto, hacer un zoom dinámico a una zona deseada, etc. Y la interactividad avanzada, permitiendo combinar varios campos como capas, plotear miembros individuales cómo isolíneas sobre mapas de probabilidad, pinchar en un punto o clicar un polígono y plotear el EPSgrama temporal o el perfil vertical correspondiente, etcétera. En la Figura 22.14 se muestra un ejemplo con un zoom dinámico.

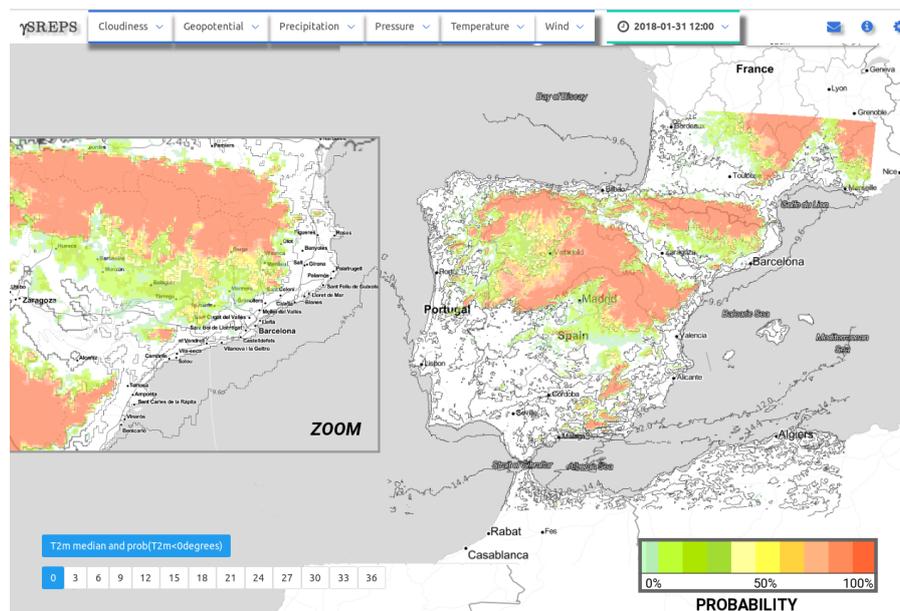


Figura 22.14: Ejemplo de visualización del portal web experimental del AEMET- $\gamma$ SREPS para la predicción operativa en el corto plazo con el producto probabilidad de helada como temperatura a 2 metros inferior a 0 °C para el día 31 de enero de 2018.

## 22.7 Resultados

ALFONS CALLADO I PALLARÉS Y MARC COMPTE ROVIOLA

Delegación Territorial en Cataluña, AEMET

La calidad y el valor de las predicciones de un sistema puede evaluarse subjetivamente con casos de estudio y objetivamente mediante métodos de verificación (cap. 15.2.3 en la página 211). Mostramos aquí verificaciones de ambos tipos.

### 22.7.1 Verificación objetiva

Objetivamente validamos un SPC con las medidas estadísticas descritas en el capítulo de verificación (sec. 15.2.3 en la página 211), normalmente comparadas con otros SPC. En nuestro caso vamos a comparar el  $\gamma$ SREPS respecto al GLAMEPS (sec. 20.2 en la página 304), el SPC más parecido disponible que cubre la península ibérica y alrededores. El mayor handicap del GLAMEPS es su peor resolución horizontal, de 8 km respecto a los 2,5 km respecto al  $\gamma$ SREPS, que sin duda lo penaliza.

Mostramos las verificaciones objetivas de dos meses, desde el 1 de septiembre al 31 de octubre de 2017,

de las pasadas de las 00 y las 12 UTC, contra 60 000 observaciones, SYNOP y de la red de estaciones automáticas de AEMET, de la relación dispersión-error (sec. 15.8.2 en la página 223) para la temperatura a 2 metros y la precipitación acumulada en 3 horas.

En ambos casos, tanto para la temperatura a 2 metros como para la precipitación acumulada en 3 horas, el  $\gamma$ SREPS verifica objetivamente (cuantitativamente) mejor que el GLAMEPS: su error es menor en la línea continua y tiene más dispersión. Es más, ambas curvas están más juntas mostrando un SPC más consistente (ver capítulo verificación para una interpretación más detallada (sec. 15.8 en la página 222).

GLAMEPS (8 km de resolución horizontal) (cap. 20 en la página 301) ha sido en AEMET el SPC operativo de corto plazo, durante un tiempo, desde la finalización del AEMET-SREPS clásico (25 km) (cap. 21 en la página 313) en 2014. Ahora, el desarrollo de AEMET- $\gamma$ SREPS (2,5 km) presenta nuevas perspectivas para la operatividad, está integrándose diariamente desde 2016 y está previsto que entre en operación para la predicción operativa en 2018. Es relevante el valor de disponer en la predicción operativa en el corto plazo de AEMET del AEMET- $\gamma$ SREPS, al ser un SPC significativamente mejor que sus predecesores GLAMEPS y AEMET-SREPS.

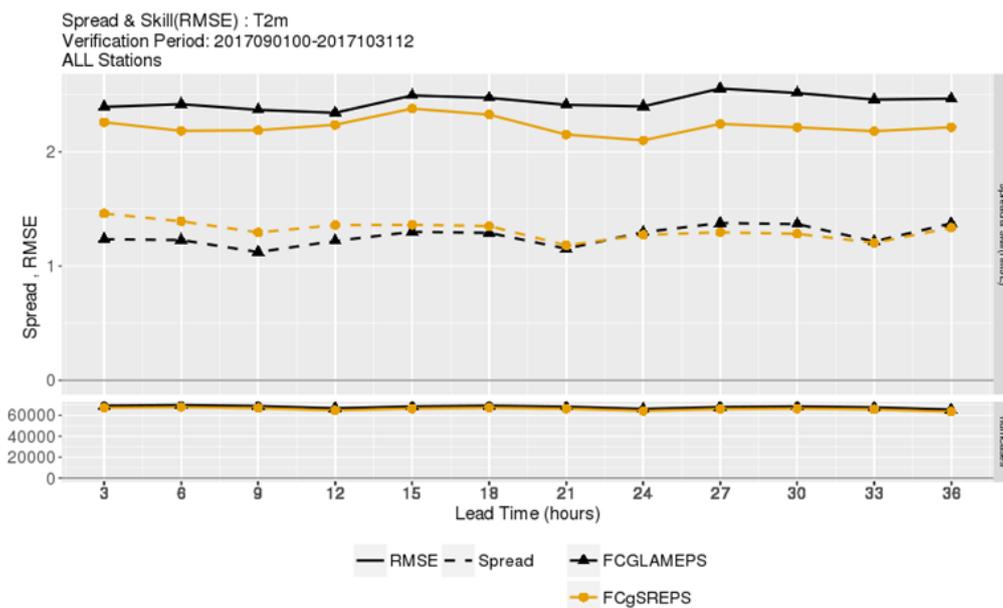


Figura 22.15: Diagrama de evolución con el alcance predictivo de dispersión y error para la temperatura a 2 metros en el período de 2 meses de septiembre y octubre de 2017 del  $\gamma$ SREPS (naranja) respecto al GLAMEPS (negro).

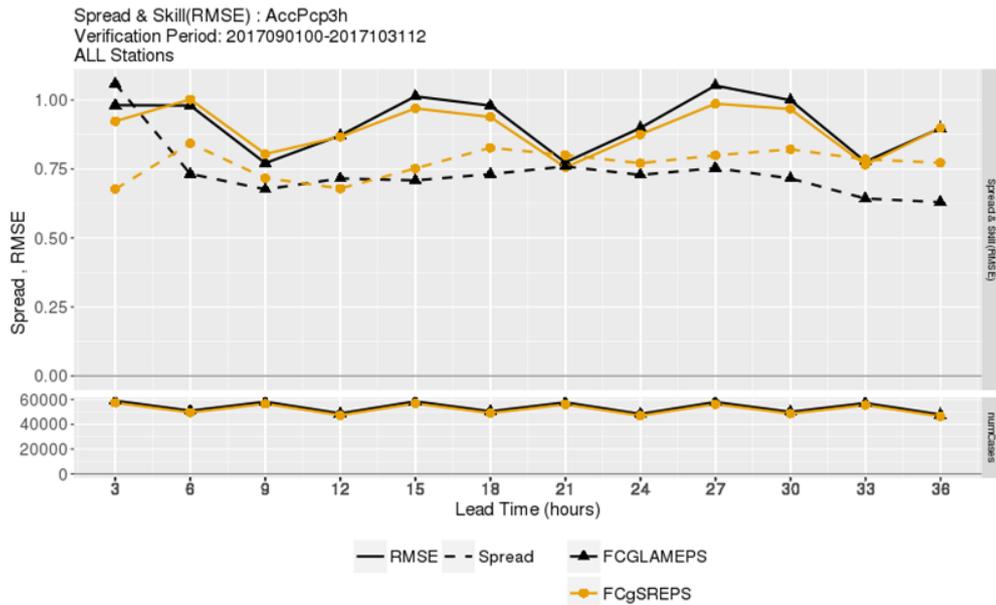


Figura 22.16: Diagrama de evolución con el alcance predictivo de dispersión y error para la precipitación acumulada en el período de 2 meses de Septiembre y Octubre de 2017 del  $\gamma$ SREPS (naranja) respecto al GLAMEPS (negro).

### 22.7.2 Verificación subjetiva

Subjetivamente o, lo que es lo mismo, comparando visualmente bajo la óptica de la discriminación del cerebro del meteorólogo-científico, podemos discernir en casos de estudio la calidad de nuestro SPC respecto a otros.

Mostramos aquí dos verificaciones subjetivas en dos casos de estudio. En ambos se comparan salidas de precipitación acumulada en 6 horas del  $\gamma$ SREPS con otro SPC, el HARMONIE-LETKF, y se verifica subjetivamente respecto a observaciones combinadas de radar y pluviómetros.

**SPC HARMONIE-LETKF.** Es un SPC con asimilación LETKF de observaciones para las condiciones iniciales (cap. 16 en la página 243), pero que no tiene en cuenta los errores del modelo (precisamente por eso se pone la *inflación*). En los 20 miembros se utiliza el mismo modelo (monomodelo), el HARMONIE-AROME.

Se debe recordar que uno de los objetivos del  $\gamma$ SREPS son los fenómenos adversos, como los de precipitaciones intensas y/o copiosas y/o persistentes. Los casos de estudio correspondientes son idóneos para verificar si  $\gamma$ SREPS realiza predicciones de calidad justamente en esos casos para los que ha sido diseñado.

#### Imágenes de estimación de precipitación corregidas de radar.

Las imágenes de precipitación del radar meteorológico originales están en reflectividades  $Z$  en  $dBZ$  que se pueden traducir a precipitación en  $mm$  o  $l/m^2$ . Tienen la ventaja de cubrir un área extensa, un círculo de 240 km de radio y la gran desventaja de que contienen muchos errores, más cuanto más lejos se está de la localización del radar en el centro del círculo. Por otro lado, los pluviómetros registran con razonable precisión la precipitación real: esta es su ventaja. Su desventaja es que lo hacen sólo en una localización y sólo informan de la precipitación en los puntos de la red de pluviómetros. Se puede combinar la información puntual de la red de pluviómetros para calibrar (en cierto sentido, corregir) las imágenes de estimación de precipitación de radar, de modo que desaparecen las desventajas. Puede apreciarse una imagen con la distribución espacial de la precipitación (casi) real en la sec. 8.7.7 en la página 110.

**Convección Mediterránea.** Caso del 9 de agosto de 2017 alrededor de Valencia de convección mediterránea asociada al paso de un frente frío. En la Figura 22.17 en la página siguiente podemos ver que la media de la precipitación acumulada del  $\gamma$ SREPS (izquierda) se asemeja en estructura y distribución a la observación-estimación radar-pluviómetro (centro) mucho mejor que el SPC HARMONIE-LETKF (derecha). Subjetivamente podemos concluir que la predicción del  $\gamma$ SREPS multimodelo fue sobresaliente.

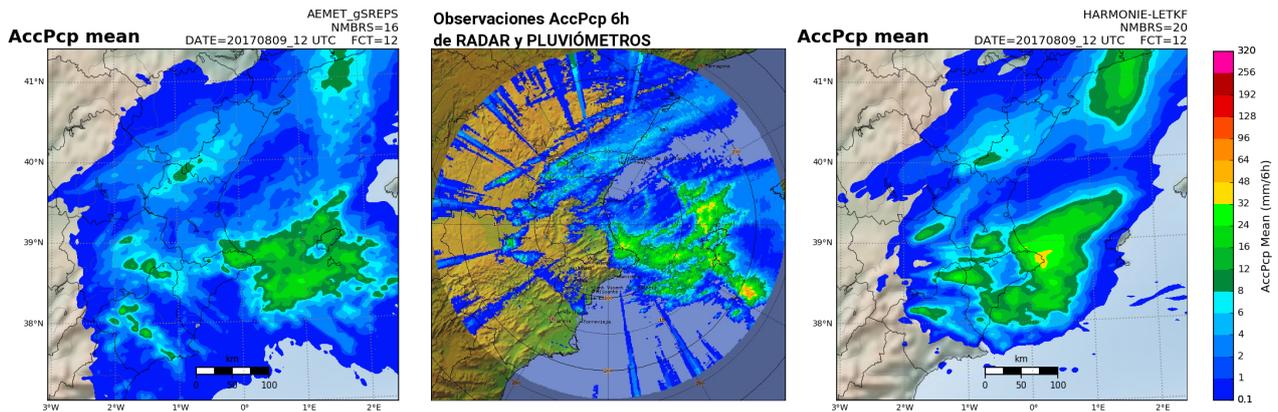


Figura 22.17: Precipitación acumulada en 6 horas para el día 9 de agosto de 2017. En el centro, la estimación radar corregida con pluviómetros. A la izquierda el  $\gamma$ SREPS y a la derecha el SPC HARMONIE-LETKF, con las predicciones a 12 horas de la precipitación acumulada media de todos los 20 miembros.

**Convección diurna.** Caso de estudio del día 15 de agosto de 2017 alrededor de Zaragoza de convección diurna disparada por el calentamiento solar. Otra vez el  $\gamma$ SREPS (izquierda) verifica subjetivamente bastante mejor que el SPC HARMONIE-LETKF, sobretodo localizando el máximo de precipitación y no generando precipitación espuria donde no se produjo, como sucede con el SPC HARMONIE-LETKF.

**Sistema convectivo de mesoescala.** Caso de estudio histórico con el  $\gamma$ SREPS reanálisis del episodio de Oliva-Gandía del 3 y 4 de noviembre de 1987, con la efeméride oficial (récord) del máximo de precipitación en un día pluviométrico en AEMET: los 817 mm del día 3. Los resultados para el  $\gamma$ SREPS se presentan en el capítulo del episodio Oliva-Gandía (sec. 44.4 en

la página 680). Otra vez, el  $\gamma$ SREPS se muestra como una adecuada herramienta para resaltar la posibilidad de que el fenómeno extremo de precipitación acumulada ocurriese, sugiriendo la posibilidad de lluvias de más de 800 mm en los dos días del episodio cerca del área donde se produjeron.

Concluimos subjetivamente que el  $\gamma$ SREPS, a pesar de no disponer todavía de asimilación, verifica excelentemente para casos de precipitaciones intensas y/o copiosas. Por tanto, el  $\gamma$ SREPS parece ser un SPC idóneo para cumplir el objetivo de ser una buena herramienta de predicción operativa para prever los fenómenos meteorológicos adversos y/o extremos en el corto plazo de AEMET.

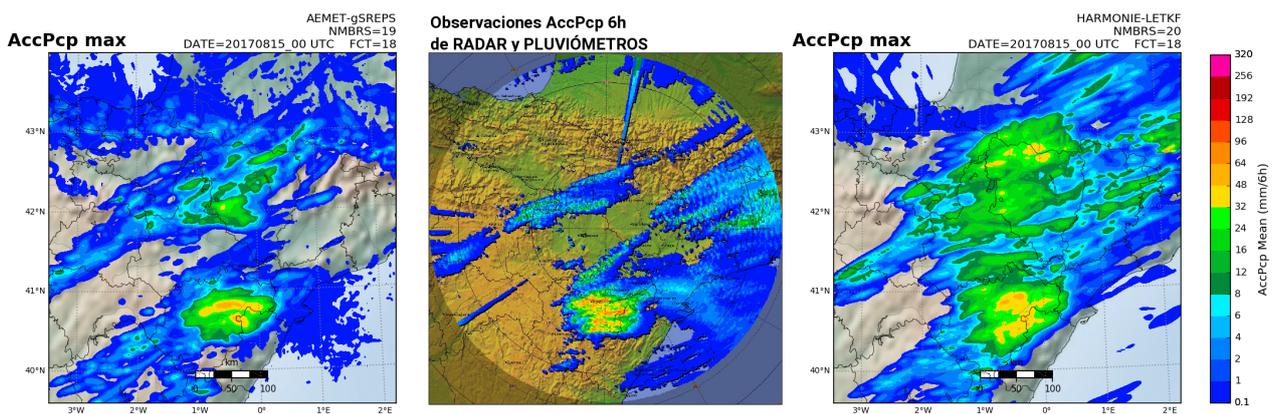


Figura 22.18: Como la Figura 22.17, salvo que para los SPC se muestran las predicciones a 18 horas de las precipitaciones acumuladas en las 6 horas anteriores máximas de entre todos los miembros en cada punto de rejilla.

## 22.8 Productos probabilistas de alta resolución

ALFONS CALLADO I PALLARÉS, DAVID GIL OLIVA Y ERNEST WERNER HIDALGO  
*Delegación Territorial en Cataluña, AEMET*

En este apartado mostramos algunos productos de **SPC** (para una introducción general a la predicción y productos probabilistas, ver cap. 27 en la página 401) del  $\gamma$ SREPS con su carácter probabilista subyacente. El objetivo es hacer un poco de hincapié en las nuevas generaciones de productos basados en **SPC** de alta resolución. Nos fijaremos, por un lado, en un par de ejemplos de cómo tratar las incertidumbres espacio-temporales y, por otro lado, en un producto específico.

Cabe recordar que las predicciones se generan en zonas cada vez más pequeñas, incluso muy locales, demandadas cada vez más por las sociedades tecnológicas y estas predicciones adolecen de una incertidumbre mayor que predicciones más generales. Desde un punto de vista teórico EDWARD N. LORENZ ya anticipaba este problema [12, 13] (cap. 17 en la página 257) en los años 60 y se ha confirmado en la práctica posteriormente. Para afianzar conceptos, diremos que no es

lo mismo predecir de manera general que va a nevar en las montañas cántabras entre 10-30 centímetros de nieve, que predecir que localmente van a caer 35 cm de nieve justo en los Lagos de Enol de Covadonga. La predecibilidad del primer caso, muy general, puede ser mucho más alta que en el segundo caso, mucho más local.

### 22.8.1 Mapas de probabilidad

**Incertidumbre espacial.** Un mapa probabilista puede enmascarar la probabilidad real de un evento meteorológico debido justamente a cómo se dibuja la probabilidad. Como vale más una imagen que mil palabras, veamos un ejemplo con el  $\gamma$ SREPS. En la Figura 22.19 podemos ver la probabilidad de chubascos, definidos como la probabilidad de precipitaciones superiores a 10 mm en 3 horas en la provincia de Valencia y en el extremo sur de las provincias de Castellón y Teruel. Las probabilidades, en escala de grises, nos muestran una probabilidad de chubascos, en general baja, del 10-20% en varias zonas dispersas, abarcando en general una zona bastante amplia (manchas grises).

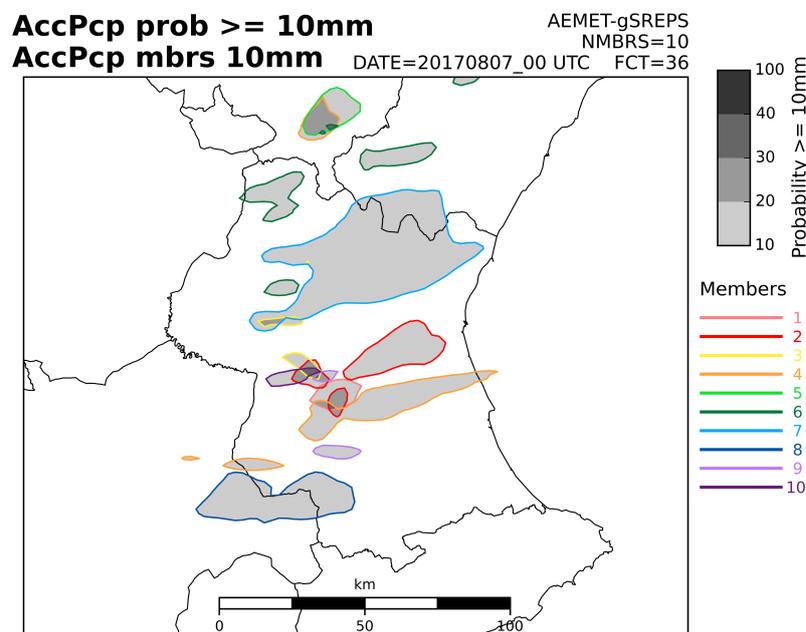


Figura 22.19: Mapa de probabilidades de precipitación acumulada en 3 horas superior a 10 mm previsto por el  $\gamma$ SREPS. Incluye el ploteo de las isóneas de precipitación acumulada de 10 mm en 3 horas para cada miembro individual del  $\gamma$ SREPS. Se incluyen sólo 10 miembros de los 20 del  $\gamma$ SREPS por simplicidad.

Pero hemos añadido más información relevante a la Figura 22.19 en la página anterior. Se trata de plotear las isolíneas de 10 mm / 3 h de todos los 10 miembros individuales que componen el SPC. Lo podemos ver con las líneas simples en colores. Y ahora viene la magia: ¿Qué pasa si nos fijamos miembro a miembro? Pues que los 10 miembros dan todos chubascos. La probabilidad de chubascos, considerando un área amplia, es del 100%. Hay una gran incertidumbre, pero es sólo espacial, pues no podemos estar nada seguros en qué lugares de Valencia, Castellón o Teruel se producirán. Pero los chubascos, *haberlos haylos*. En otras palabras, es sólo la localización del evento (chubasco) lo que tiene una predecibilidad baja, pero no la ocurrencia del evento en sí.

¿Tener en cuenta la incertidumbre espacial nos permite hacer una predicción mejor? Pues sí. Con el nuevo producto mostrado, incluyendo ploteo de los miembros individuales, podemos asegurar que habrá chubascos locales en algún lugar del interior de las tres provincias.

Ploteando sólo las probabilidades queda enmascarada, en cierto sentido, la probabilidad de chubascos y su incertidumbre espacial. Pero la Figura 22.19 en la página anterior incluyendo los miembros individuales, podría ser uno de los caminos de una nueva generación de productos de los SPC que contengan información explícita para evaluar la incertidumbre espacial (ver sec. 27.13 en la página 436).

## 22.8.2 EPSgramas para aeropuertos

**Incetidumbre temporal.** Imaginemos que somos predictores y debemos predecir la precipitación en el

Aeropuerto de Barcelona, para las 12 primeras horas del día de mañana, en nuestro ejemplo el 5 de Abril de 2016. Disponemos para ello de un EPSgrama de la última salida del  $\gamma$ SREPS a las 12 UTC del día 4, mostrado en la Figura 22.20 (para la interpretación de EPSgramas véase sec. 27.8.1 en la página 425 y cap. 31 en la página 523).

Un predictor con poca experiencia podría tener la tentación de pensar que la precipitación máxima seguiría la línea negra, es decir, siempre la máxima probabilidad de precipitación. Sumando los máximos, podría llegar a una conclusión errónea: caerán 62 mm en 24 horas (62 es, más o menos, la suma de  $8+10+8+9+19+5+3$ ).

Un predictor experimentado no lo tendría tan claro y buscaría más información. En realidad, intuyendo la baja predecibilidad de cuándo exactamente va a llover, debido a la dispersión del EPSgrama (anchura del penacho), le gustaría saber qué hace algún miembro individual representativo del  $\gamma$ SREPS. En la Figura 22.20 se han ploteado esos 3 miembros representativos: el miembro mbr001 (magenta) representa el que tiene una precipitación acumulada media en las 12 horas primeras horas del día 5. El mbr002 (verde) representa a uno de los que ha acumulado más precipitación y el mbr003 (amarillo) el que menos, ambos en ese período de 12 horas. ¿Y qué ve este predictor experimentado? Pues que la precipitación máxima que se puede acumular es de unos 20-25 mm, y que lo que tiene delante es una incertidumbre temporal de cuándo va a llover: el mbr002 (verde) da precipitación por la mañana, el mbr001 (magenta) al mediodía y el mbr003 (amarillo) avanzada la tarde y fuera ya del período de interés.

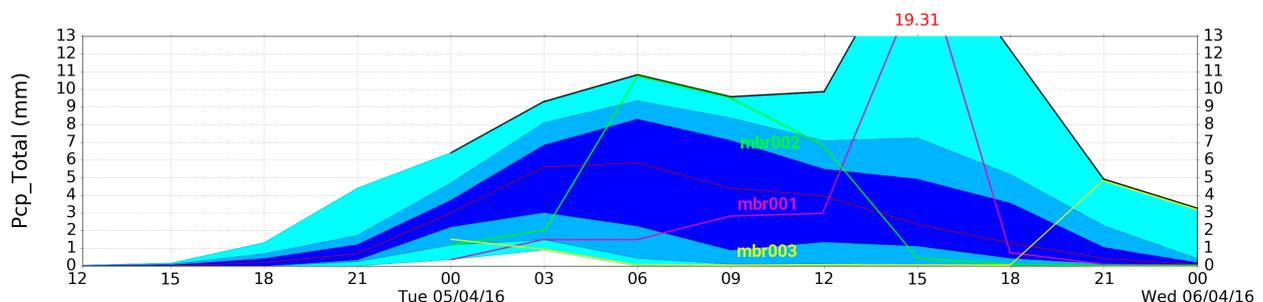


Figura 22.20: EPSgrama de la probabilidad de precipitación acumulada cada 3 horas en el Aeropuerto de Barcelona (LEBL), incluyendo la evolución de las precipitaciones de tres miembros individuales del SPC durante el día 5 de Abril de 2016: miembro 1 en magenta (mbr001), miembro 2 en verde (mbr002) y miembro 3 en amarillo (mbr003).

## Barcelona airport

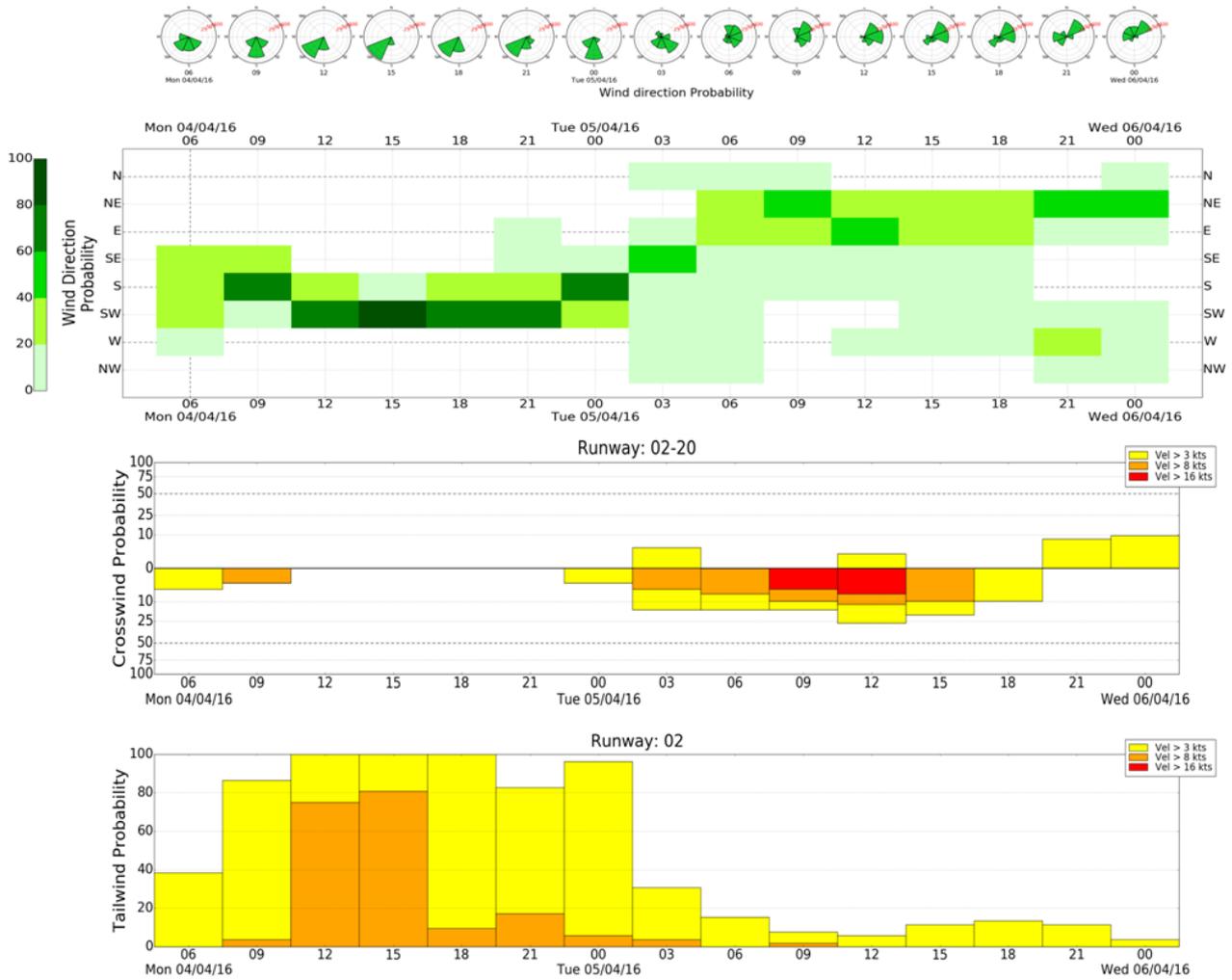


Figura 22.21: AEROgramas específicos para la pista 02-20 del Aeropuerto de Barcelona para los días 4 y 5 de Abril de 2016. De arriba abajo: rosetas de probabilidades de dirección del viento cada 3 horas; probabilidad de la dirección del viento en EPSgrama; EPSgrama de probabilidades de viento cruzado (perpendicular a la pista) por encima de 3, 8 y 16 nudos; EPSgrama como el anterior pero para el viento de cola (en la dirección de la pista).

Una nueva generación de EPSgramas, como el ejemplo mostrado de incluir algunos miembros representativos, ofrecería la posibilidad de desentrañar la posible incertidumbre temporal escondida bajo las probabilidades.

### 22.8.3 AEROgramas

Puede consultarse el capítulo 31 en la página 523 como introducción a productos específicos aeronáuticos. Hay usuarios finales especializados con necesidades muy específicas. Una nueva línea de productos basados en SPC de alta resolución, también podrían incluir productos muy especializados en áreas o zonas muy locales, para cuya generación ya se dispondría de varios puntos de rejilla. Algunos ejemplos podrían ser

aeropuertos y parques eólicos de molinos de viento. En la figura 22.21 se muestran EPSgramas especializados para la aeronáutica: AEROgramas.

En los aeropuertos, lo más importante para las operaciones de aterrizaje y despegue, es el viento, pero no cualquier viento, sino el viento de cola o en la dirección de la pista y el viento cruzado o en el cuadrante perpendicular a la pista.

El AEROgrama de más abajo en la Figura 22.21 muestra durante las horas centrales del día 4 de Abril que la probabilidad de un viento de cola sea superior a 3 nudos es segura y de que sea superior a 8 nudos es del 80%. Esto llevaría a los controladores del Aeropuerto de Barcelona, nuestros usuarios especializados, a cambiar durante la mañana de ese día la configuración

de la pista, es decir intercambiar cabecera y cola de la pista en despegues y aterrizajes para realizar respectivamente unos con el viento a favor y los otros con el viento en contra.

Y fijándonos en el penúltimo AEROgrama en la Figura 22.21 en la página anterior, el del viento cruzado, vemos que para el final de la mañana del día 5 de Abril y, sobretodo, durante el mediodía de ese día, hay una probabilidad baja, de un 10%, de vientos fuertes cruzados superiores a 16 nudos. Aunque la probabilidad sea sólo del 10%, desde la torre del aeropuerto se tendrá que estar alerta a esa posibilidad, que podría alterar la frecuencia normal de aterrizajes y despegues de la pista produciendo indeseables retrasos en ambas operaciones.

**Viento de cola y cruzado.** Los aviones quieren aterrizar contra el viento y despegar con el viento a favor o de cola: en el primer caso la velocidad respecto al suelo del avión es menor y aterrizan con menos pista y más rápido; en el segundo caso, el viento los empuja para despegar, siendo el despegue más rápido y con menos pista. Y a los aviones les importunan en los aterrizajes y los despegues los vientos de cierta intensidad perpendiculares a la pista. De ahí el producto específico en forma de AEROgrama mostrado en la Figura 22.21 en la página anterior.

## 22.9 Calibración

JESÚS RODRÍGUEZ DÉNIZ  
Area de Innovación, AEMET

Como sabemos, el proceso de predicción tiene una incertidumbre asociada, por un lado, a las condiciones iniciales y, por otro, a la simplificación de las ecuaciones generales para la resolución numérica de la evolución del estado de la atmósfera. Con los SPC intentamos simular adecuadamente esas incertidumbres y existen un conjunto de técnicas que permiten calibrar las mismas por medio de la aplicación de algunos métodos estadísticos a las predicciones directas de los SPC. La calibración de ensembles, en este contexto, es el posproceso que trata de corregir las salidas directas de los ensembles teniendo en cuenta las observaciones. Si se aplican herramientas estadísticas, entonces hablamos de calibración estadística de ensembles.

El margen para la mejora está en las formas limitadas de tener en cuenta las citadas incertidumbres. Esperamos de los ensembles usados para la predicción meteorológica una correlación entre la dispersión y el

error (sec. 15.8.2 en la página 223) pero, en la práctica, los SPC tienden a ser subdispersivos (menos dispersión que error). Por este motivo, en los últimos años, ha emergido como solución la calibración de ensembles, en particular con métodos estadísticos, tomando simultáneamente las predicciones que queremos mejorar y las observaciones.

En el proceso de calibración se deben tener en cuenta las dimensiones del conjunto de datos utilizados para una fase del proceso de calibración llamada *entrenamiento*. Algunos estudios realizados han mostrado que la utilización de grandes conjuntos de datos para el entrenamiento producen una mejora significativa del mismo. Aumentando el tamaño muestral aumenta la significación estadística del proceso de calibración. No se trata, por otro lado, de aumentar indiscriminadamente el rango temporal del conjunto de datos utilizados para calibrar: la combinación de periodos muy largos, con situaciones meteorológicas diversas, puede llevar a que el entrenamiento no incorpore información relevante para la calibración o que aporte otra información que suavice las rectificaciones necesarias.

Las Figuras 22.22 y 22.23 en la página siguiente comparan diferentes medidas de calidad y rendimiento del  $\gamma$ SREPS, tanto crudo como calibrado con diferentes parámetros.

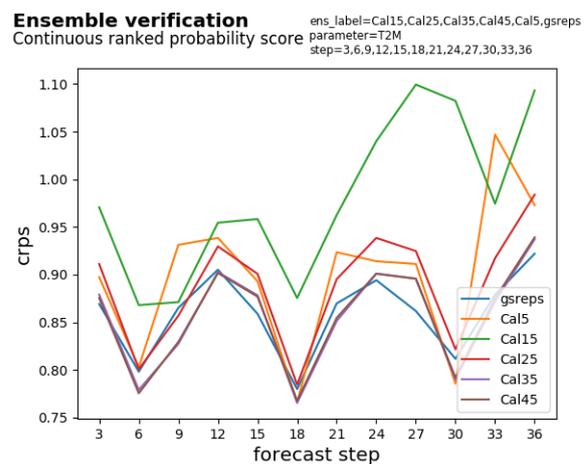


Figura 22.22: Curvas de evolución con el alcance predictivo del continuous ranked probability score (CRPS [2, 5]) de predicciones de temperatura a 2 m. Se compara el  $\gamma$ SREPS (azul) con 5 diferentes calibraciones del mismo (resto de colores). Al tratarse de un error en el espacio de las probabilidades, cuanto más pequeño el CRPS, mejor la calidad de las predicciones. Vemos que usando esta medida solamente una calibración consigue mejorar la calidad del  $\gamma$ SREPS, mientras que las demás no mejoran o degradan la calidad en diferentes márgenes.

**Ensemble verification**

Response to binary events

```

ens_label=Cal45,Cal5,gsreps,Cal15,Cal25,Cal35
parameter=T2M
step=6
threshold=q50%,q50%

```

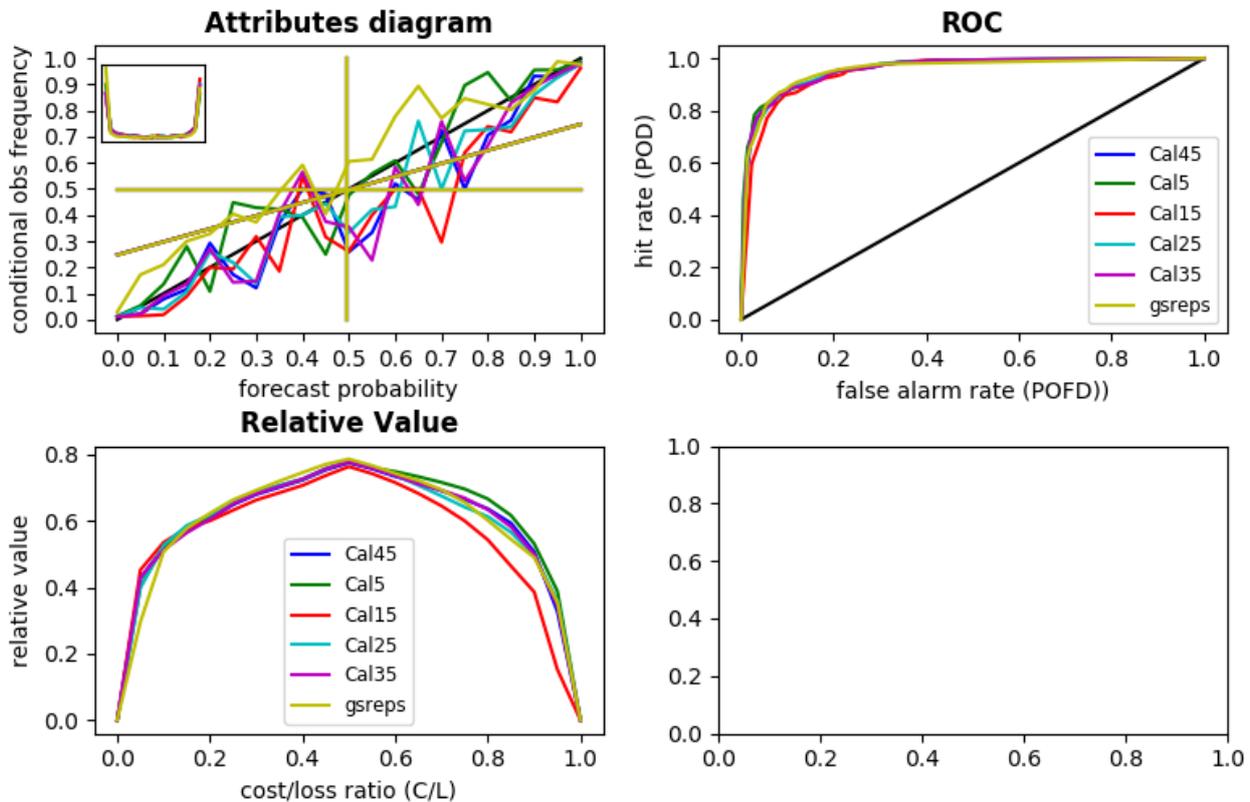


Figura 22.23: Mosaico con diversas gráficas de contraste de rendimiento de predicciones de temperatura a 2 m. Se compara el  $\gamma$ SREPS (amarillo) con 5 diferentes calibraciones del mismo (resto de colores). Arriba a la izquierda diagrama de atributos, cuanto más cerca de la diagonal más fiables las predicciones. Arriba a la derecha curvas ROC, cuanto más área bajo la curva más capacidad discriminativa tienen las predicciones. Abajo a la izquierda envolventes de valor relativo, cuanto más área bajo la curva, tanto más valor aporta la predicción. Vemos que algunas calibraciones no mejoran el rendimiento del  $\gamma$ SREPS y otras sí, con unos márgenes, en cualquier caso, no muy amplios. Para la interpretación exhaustiva de las gráficas, pueden consultarse las referencias [9, 10, 21] o el capítulo 15 en la página 207.

## 22.10 El proyecto SRNWP EPS Phase II de EUMETNET

JOSÉ ANTONIO GARCÍA-MOYA ZAPATA

Ex Meteorólogo, Área de Innovación, AEMET

European Meteorological Services Network (**European Meteorological Network (EUMETNET)**) es un grupo de 31 Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) Europeos que forman un marco de trabajo para organizar programas de colaboración corporativos entre sus miembros en el campo de la meteorología y otros campos afines. Sus principales actividades incluyen sistemas de observación, proceso de datos, productos básicos de predicción, investigación, desarrollo y entrenamiento.

Uno de los proyectos de investigación que se está llevando a cabo en el marco de **EUMETNET** es el proyecto **SRNWP EPS II** que trata de dar cabida a la cooperación de los miembros en el campo de la predicción por conjuntos en el área limitada (LAM-EPS). Esta cooperación ha sido reconocida como de alta prioridad entre los objetivos de **EUMETNET**.

El proyecto está dedicado a la cooperación en el campo de los llamados sistemas de predicción por conjuntos (**SPC** o *ensembles*) a escala kilométrica que están ayudando a los servicios meteorológicos a mejorar sus predicciones de tiempo adverso introduciendo en ellas aproximaciones probabilistas.

El proyecto incluye dos paquetes de trabajo complementarios: uno de aplicación en el que se desarrollan

nuevas herramientas y metodologías para la calibración de productos de ensembles y para el desarrollo de posprocesos de ensembles para la predicción de nieblas y tormentas. El segundo paquete de trabajo es básicamente de investigación y consiste en trabajos que estudien la sensibilidad de los SPC a las condiciones del suelo y de la PBL. Estos trabajos se dirigen a la mejora de la predicción de las nieblas y las tormentas y se focalizan en:

- Asimilación de datos de suelo y superficie. Perturbaciones de los esquemas de suelo y de la PBL.
- Introducir la incertidumbre de los datos de uso de suelo en las perturbaciones.

Los resultados del paquete de trabajo servirán para mejorar el conocimiento acerca del impacto de las diferentes propiedades del suelo en las predicciones probabilísticas.

El proyecto organiza una reunión de trabajo cada año en la que los diferentes participantes intercambian los

resultados de los trabajos ejecutados en el marco del proyecto. Dichas reuniones cuentan también con la participación de invitados externos al proyecto cuyas presentaciones y experiencias sirven para validar las tareas realizadas en el marco del mismo.

La coordinación del proyecto se comparte entre la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el Servicio Meteorológico de Italia (Centro Operativo per la Meteorologia, COMET) y el Servicio Meteorológico de la región de Italia Emilia-Romagna (ARPA-SIMC). Los SMN participantes son, además de España e Italia, Chequia, Croacia, Dinamarca, Finlandia, Polonia, Islandia, Portugal, Holanda, Irlanda, Noruega, Gran Bretaña, Suiza, Hungría, Serbia, Bélgica, Eslovenia, Eslovaquia, Suecia y Austria. El proyecto comenzó el 1 de Julio de 2015 y terminará el 31 de Diciembre de 2018 y ha sido financiado totalmente por las aportaciones, en metálico y en especie, de los países participantes a través de EUMETNET.

## 22.11 Referencias

- [1] BENGTTSSON, Lisa y col. "The HARMONIE-AROME Model Configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP System". En: *Monthly Weather Review* 145.5 (mayo de 2017), páginas 1919-1935. ISSN: 0027-0644. DOI: [10.1175/MWR-D-16-0417.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1) (citado en página 346).
- [2] CANDILLE, Guillem y col. "Verification of an Ensemble Prediction System against Observations". En: *Monthly Weather Review* 135.7 (2007), páginas 2688-2699. ISSN: 0027-0644. DOI: [10.1175/MWR3414.1](https://doi.org/10.1175/MWR3414.1) (citado en página 357).
- [3] EBISUZAKI, W y KALNAY, Eugenia. "Ensemble experiments with a new lagged average forecasting scheme". En: *WMO Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling Rep* 15 (1991), página 308 (citado en página 341).
- [4] GARCÍA-MOYA, José Antonio y col. "Predictability of short-range forecasting: A multimodel approach". En: *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63.3 (mayo de 2011), páginas 550-563. ISSN: 02806495. DOI: [10.1111/j.1600-0870.2010.00506.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00506.x) (citado en página 345).
- [5] HERBACH, Hans. "Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems". En: *Weather and Forecasting* 15.5 (oct. de 2000), páginas 559-570. ISSN: 0882-8156. DOI: [10.1175/1520-0434\(2000\)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2) (citado en página 357).
- [6] HOHENEGGER, Cathy y SCHÄR, C. "Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales". En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 88.11 (2007), páginas 1783-1793. ISSN: 00030007. DOI: [10.1175/BAMS-88-11-1783](https://doi.org/10.1175/BAMS-88-11-1783) (citado en página 335).
- [7] HOHENEGGER, Cathy y SCHÄR, Christoph. "Predictability and error growth dynamics in cloud-resolving models". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 64.12 (2007), páginas 4467-4478 (citado en página 335).
- [8] JANJIC, Zavisla y GALL, L. "Scientific documentation of the NCEP nonhydrostatic multiscale model on the B grid (NMMB). Part 1 Dynamics". En: (2012) (citado en página 346).
- [9] JOLLIFFE, Ian T. y STEPHENSON, David B. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. 2003, página 254. ISBN: 0470864419. DOI: [10.1016/j.ijforecast.2005.11.002](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2005.11.002) (citado en página 358).
- [10] JOLLIFFE, Ian T. y STEPHENSON, David B. "Introduction". En: *Forecast Verification*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011, páginas 1-9. ISBN: 9781119960003. DOI: [10.1002/9781119960003.ch1](https://doi.org/10.1002/9781119960003.ch1) (citado en página 358).
- [11] LINDBORG, Erik. "Can the atmospheric kinetic energy spectrum be explained by two-dimensional turbulence?" En: *Journal of Fluid Mechanics* 388 (1999), páginas 259-288. DOI: [10.1017/S0022112099004851](https://doi.org/10.1017/S0022112099004851) (citado en página 334).
- [12] LORENZ, Edward N. "Deterministic Non-periodic Flow". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 20.2 (mar. de 1963), páginas 130-141. ISSN: 0022-4928. DOI: [10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2) (citado en página 354).
- [13] LORENZ, Edward N. "The predictability of a flow which possesses many scales of motion". En: *Tellus* 21.3 (jun. de 1969), páginas 289-307. ISSN: 00402826. DOI: [10.3402/tellusa.v21i3.10086](https://doi.org/10.3402/tellusa.v21i3.10086) (citado en páginas 334, 335, 354).
- [14] LORENZ, Edward N. "Predictability: A problem partly solved". En: *Proc. Seminar on predictability*. Volumen 1. 1. 1996 (citado en página 335).
- [15] ORLANSKI, L. "A rational subdivision of scale for atmospheric processes". En:

- Bull. Amer. Meteor. Soc.* 56 (1975), páginas 527-530 (citado en página 334).
- [16] PALMER, T N. “Towards the probabilistic Earth-system simulator: a vision for the future of climate and weather prediction”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 138.665 (2012), páginas 841-861. ISSN: 1477-870X. DOI: [10.1002/qj.1923](https://doi.org/10.1002/qj.1923) (citado en página 337).
- [17] PALMER, T N y col. “Stochastic parametrization and model uncertainty”. En: *ECMWF Tech. Memo* 598 (2009), páginas 1-42 (citado en página 342).
- [18] SKAMAROCK, W C y col. “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”. En: 27 (2008), páginas 3-27 (citado en página 346).
- [19] SKAMAROCK, William C y col. *A description of the advanced research WRF version 2*. Informe técnico. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale y Microscale Meteorology Div, 2005 (citado en página 346).
- [20] TERMONIA, P y col. “The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1”. En: *Geoscientific Model Development* 11.1 (2018), páginas 257-281. DOI: [10.5194/gmd-11-257-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018) (citado en página 346).
- [21] WILKS, Daniel S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2011, página 676. ISBN: 9780123850225. URL: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/international-geophysics/vol/100> (citado en páginas 336, 358).

