

# Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: resultados del periodo 2020-2024

Nota Técnica SMN 2025-200

**Cynthia Matsudo<sup>1</sup>, Yanina García Skabar<sup>1</sup>, Soledad Osores<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Dirección de Productos de Modelación Ambiental y Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, Servicio Meteorológica Nacional*

Agosto 2025

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional. La información aquí presentada puede ser reproducida a condición de que la fuente sea adecuadamente citada.*

## Resumen

Esta nota técnica presenta una evaluación del desempeño de los pronósticos determinísticos y probabilísticos del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN) durante el período de estudio comprendido entre el año 2020 y 2024. Constituye una actualización de los resultados para el periodo 2020-2022 presentados en Matsudo y García Skabar, 2023. En particular, se comparan los pronósticos del ciclo 06 UTC frente a observaciones provenientes de la red de estaciones de superficie del SMN. En la medida de lo posible, se incluye una comparación con pronósticos provenientes del modelo global de menor resolución GFS. Las variables verificadas son: precipitación acumulada en 24h, temperatura a 2m, temperatura mínima y máxima diarias y magnitud de viento. Asimismo, se incluye una comparación con variables calibradas. Los resultados muestran el impacto de la calibración en las temperaturas máximas diarias y la mejor correspondencia entre la distribución de la precipitación del SAP.SMN y las observaciones frente al modelo de menor resolución.

## Abstract

This technical note presents an evaluation of the performance of deterministic and probabilistic forecasts from the Data Assimilation and Numerical Prediction System of the National Meteorological Service of Argentina (SAP.SMN) during the study period from 2020 to 2024. It constitutes an update of the results for the 2020–2022 period presented in Matsudo and García Skabar (2023). In particular, the 06 UTC cycle forecasts are compared against observations from the SMN surface station network. Where possible, a comparison is included with forecasts from the lower-resolution global GFS model. The verified variables are: 24-hour accumulated precipitation, 2m temperature, daily minimum and maximum temperatures, and wind speed. Additionally, a comparison with calibrated variables is included. Results show the positive impact of calibration on daily maximum temperatures and better correspondence between precipitation distribution of SAP.SMN and observations compared to the lower-resolution model.

**Palabras clave:** SAP.SMN, verificación, WRF, GFS

## Citar como:

Matsudo C., Y. García Skabar, S. Osorio, 2025: Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: resultados del periodo 2020-2024. Nota Técnica SMN 2025-200.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ejecuta en forma operativa el modelo de pronóstico numérico del tiempo *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock y otros, 2019) proporcionando pronósticos regionales en alta resolución tanto en su versión determinística como probabilística desde 2016 y 2020, respectivamente (Matsudo y otros, 2022). Desde entonces, se ha desarrollado e implementado un esquema de verificación con el fin de cuantificar el desempeño de los pronósticos numéricos que se ejecutan operativamente. Esta nota técnica es una actualización de los resultados presentados en Matsudo y García Skabar (2023).

El objetivo de esta nota técnica es presentar los resultados de la evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN), analizando su componente determinística (SAP.SMN-DET) y probabilística (SAP.SMN-ENS) para la hora de inicialización 06 UTC frente a observaciones provenientes de la red de estaciones de superficie del SMN para el periodo de 5 años comprendidos entre 2020 y 2024. En los casos que sea posible, se incluye una comparación con el modelo global GFS de menor resolución.

## 2. DATOS y METODOLOGÍA

El SAP.SMN emplea desde 2020 el modelo regional WRF v4.0 (Skamarock y otros, 2019) en un dominio computacional que cubre Argentina y los océanos adyacentes (Figura 1). El mismo consta de 1000 x 1250 puntos de retícula, con una resolución horizontal de 4 km y 45 niveles verticales, con el tope del modelo en 10 hPa. En forma operativa, se ejecutan 4 inicializaciones diarias (00, 06, 12 y 18 UTC). El SAP.SMN-ENS consta de un ensamble multifísico de 20 miembros donde se combinan 3 esquemas de capa límite planetaria y 2 esquemas de microfísica, dando lugar a un total de 6 combinaciones posibles (más detalles sobre la configuración se pueden encontrar en Dillon y otros, 2020). Cabe destacar que dada la resolución horizontal empleada no se parametriza la convección.

Las condiciones iniciales y de borde del SAP.SMN son provistas por los análisis y pronósticos del modelo *Global Forecasting System* (GFS) del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), respectivamente. Las mismas se obtienen combinando la versión determinística con 0.25° de resolución horizontal y por ensambles con 0.5° de resolución horizontal (GEFS; Zhou y otros, 2017), sumando a la simulación determinística del GFS las perturbaciones del GEFS, i.e., diferencia entre cada uno de los miembros y la media del ensamble; obteniendo así 20 perturbaciones iniciales y de borde con 0.25° de resolución horizontal.



**Figura 1:** Dominio computacional del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN).

Las variables pronosticadas que se verifican son: temperatura a 2 metros (T2m), temperatura a 2 metros calibrada (T2cal), temperatura mínima y máxima sin calibrar y calibradas (Tmín\_f, Tmáx\_f, Tmín\_cal, Tmáx\_cal respectivamente), magnitud del viento a 10m sin calibrar (magViento) y calibrada (magVientocal) y precipitación acumulada en 24 horas (PP24). Para los 4 ciclos, la temperatura mínima corresponde al valor mínimo horario pronosticado entre 00 y 12Z (horas de la mañana) mientras que la temperatura máxima corresponde al valor máximo horario pronosticado entre 12 y 00Z (horas de la tarde). Se verifican los valores correspondientes al “día+1” siendo “día” la fecha de análisis de la corrida. Los respectivos valores calibrados (Tmáx\_cal y Tmín\_cal) se obtienen aplicando la misma metodología de calibración que para T2cal (Cutraro y otros, 2020). En el caso de las Tmín\_cal y Tmáx\_cal de GFS solo están disponibles a partir de julio de 2020. Con relación a los pronósticos de precipitación, si bien tienen resolución horaria, en este informe se verifica la precipitación acumulada de 24 horas, entre las 9 hs de un día y el siguiente, que coincide con el día pluviométrico.

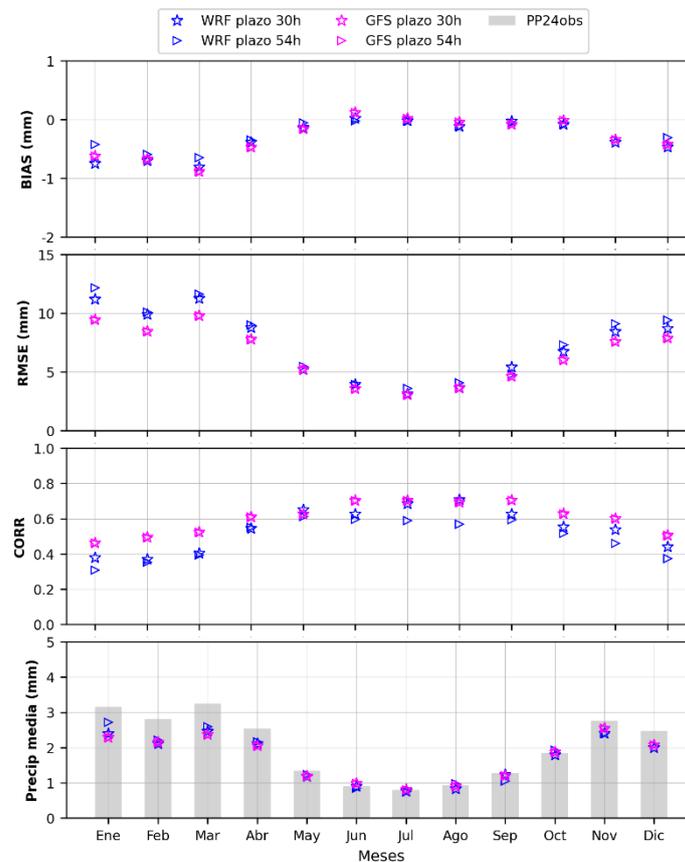
El desempeño de los pronósticos se midió utilizando las observaciones provenientes de la red de estaciones convencionales de superficie del SMN correspondientes al periodo 2020-2024. Por cuestiones metodológicas y de disponibilidad de información, para este informe se consideraron 101 estaciones meteorológicas (ver ANEXO I en Matsudo y García Skabar 2023). Cabe destacar que el régimen de medición de la red de estaciones no es uniforme por lo que la disponibilidad de observaciones a lo largo del día depende de cada estación lo que puede tener un impacto variable en los resultados. Para el cálculo de los estadísticos de verificación (ver ANEXO II en Matsudo y García Skabar 2023), los datos observados se comparan con el dato del punto más cercano de la retícula de cada modelo. En este sentido, se contempla que dicho punto quede ubicado sobre tierra en el caso de estaciones cercanas a la costa y tengan la mayor correspondencia con la altura de la estación (más detalles en Cutraro y otros, 2020).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados del desempeño del SAP.SMN para la componente determinística y probabilística. En la mayor parte de los casos, se presentan los resultados para la inicialización de 06 UTC dado que los otros ciclos muestran resultados similares.

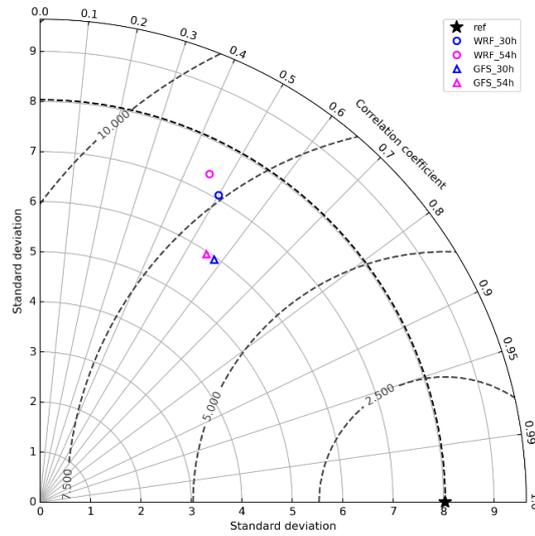
### 3.1.1 Precipitación

En primer lugar, se hace una inspección del desempeño de la serie anual de PP24 media de todo el país (Figura 2). Se puede ver que en los meses de primavera/verano (diciembre a abril) se observa por los valores de BIAS una subestimación mayor del SAP.SMN-DET que para GFS para ambos plazos de 30 y 54h. En particular, la serie de RMSE muestra que para los meses de enero a abril la subestimación para el SAP.SMN-DET promedia los 10 mm mientras que en diciembre se mantiene por debajo. Este comportamiento también se aprecia en el último panel donde el volumen total de precipitación pronosticado por ambos modelos queda por debajo de los valores observados.



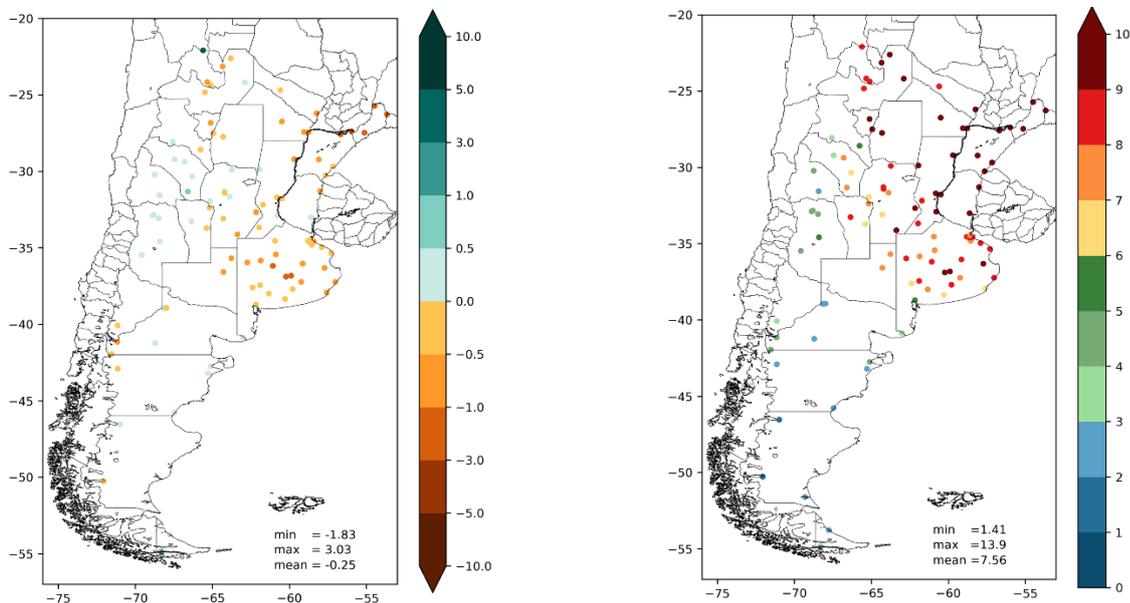
**Figura 2:** Serie anual de estadísticos continuos de la PP24 por WRF y GFS (ciclo 06Z, plazo 30h y 54h). Las barras grises en el último panel indican el valor de PP24 total observado en todas las estaciones para cada mes.

El diagrama de Taylor (Figura 3) muestra que el GFS presenta menor RMSE y mayor coeficiente de correlación de Pearson para los plazos de 30 y 54 h. Sin embargo, ambos modelos subestiman la variabilidad observada. Estos resultados pueden responder a la condición de “doble penalización” (Gilleland y otros, 2009) que sufre el desempeño de un pronóstico de alta resolución frente a uno de menor resolución. En este sentido, el pronóstico de alta resolución logra capturar detalles más finos e intensidades más altas que no se logran detectar con un modelo de menor resolución como el GFS. Asimismo, si los patrones de precipitación quedan apenas desplazados respecto de los observados, se contabiliza no solo el error de posición sino también el de intensidad lo que se traduce en errores grandes para las métricas de verificación usuales que se computan punto a punto.



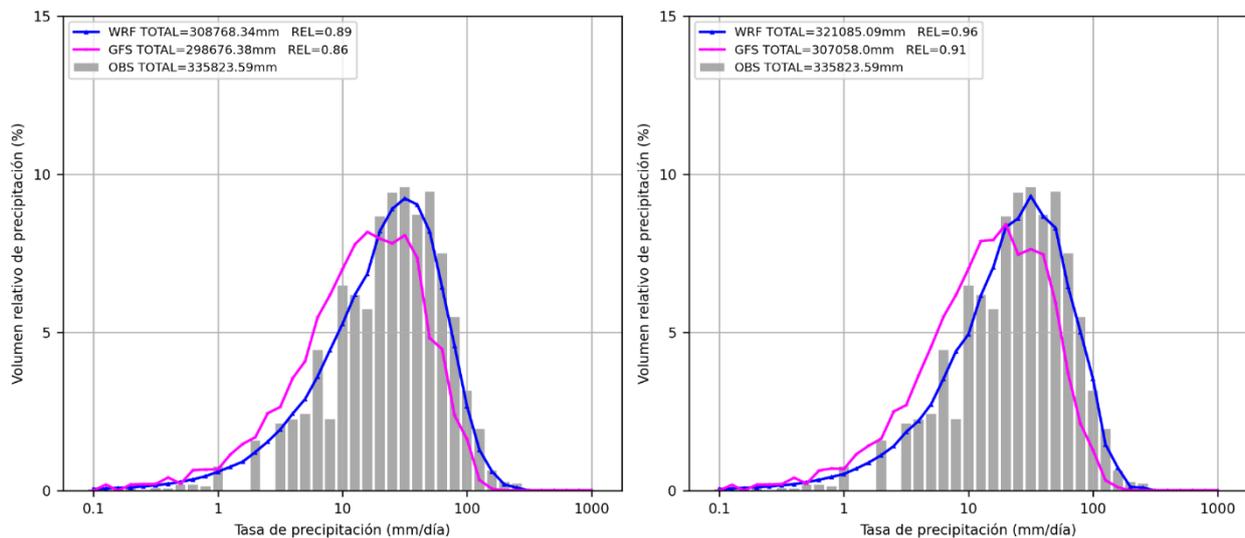
**Figura 3:** Diagrama de Taylor comparando SAP.SMN-DET (triángulos) y GFS (círculos) para PP24 (ciclo 06Z, plazo 30h y 54h).

La distribución de los errores del SAP.SMN-DET a lo largo del país se puede ver en la Figura 4. Se puede ver que la mayor subestimación se observa en las estaciones del centro y noreste del país mientras que las estaciones más cercanas a la cordillera, así como las patagónicas reflejan sobrestimación baja de acuerdo a los valores de BIAS (panel izq.). Estas últimas muestran un desvío cercano a 1 mm mientras que en el caso de las estaciones alejadas de la topografía, el desvío supera los 6 mm (panel der.).



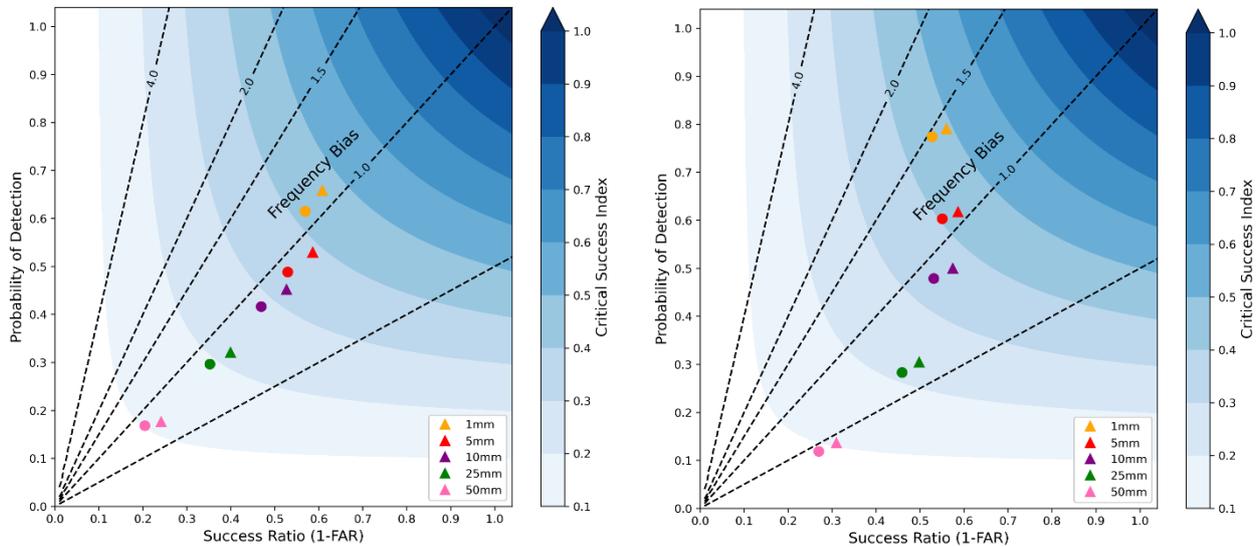
**Figura 4:** Mapas de BIAS del SAP.SMN-DET (izq.) y RMSE (der.) de la PP24 (ciclo 06Z, plazo 30h). Los valores en la esquina inferior derecha indican el mínimo, promedio y máximo sobre el total de las estaciones sobre el periodo de verificación.

Respecto de la distribución de probabilidad de volumen de precipitación (Figura 5) indica que ambos modelos subestiman el volumen total tanto en los pronósticos del día 0 (plazo 30h) y en menor medida para el día+1 (plazo 54h). Esto se refleja en el valor de la correspondencia entre el volumen total de precipitación observado y pronosticado por el SAP.SMN-DET que muestra valores más cercanos a 1 que el GFS (ver volúmenes pronosticados y medidos en el recuadro dentro de cada panel). Asimismo, la curva del SAP.SMN-DET acompaña mejor la forma de la distribución observada, lo que significa un mayor porcentaje de la precipitación total explicado en cada intervalo de lluvia (volumen relativo de precipitación). En cambio, la distribución del modelo GFS queda desplazada hacia las precipitaciones más débiles en comparación con el máximo de precipitación observada.



**Figura 5:** PDFs volumétricas de PP24 para el modelo WRF (línea azul) y GFS (línea fucsia) (ciclo 06Z) y distribución del volumen de precipitación de las observaciones (barras grises) válidas para el día 0 (izq.) y para el día+1 (der.) (ciclo 06Z). En el cuadro se indican los valores totales de precipitación observada y pronosticada considerando el total de estaciones y la relación entre el total pronosticado respecto al observado.

La Figura 6 muestra los diagramas de desempeño para el SAP.SMN-DET (panel izq.) y GFS (panel der.) que resumen los valores de los estadísticos categóricos para distintos umbrales de precipitación. El SAP.SMN-DET tiene un mejor desempeño mostrando un FBIAIS cercano a 1 para todos los umbrales y plazos. En particular, salvo para el umbral de 1mm, los eventos con precipitaciones mayores quedan subestimados. En el caso del GFS, parece mostrar valores más altos de CSI para todos los umbrales, sin embargo, los eventos mayores a 1 mm quedan sobreestimados en un 50% mientras que, por otra parte, los que superan los 25mm son subestimados en alrededor de un 50%. Hay que destacar que, si bien el CSI disminuye al aumentar el plazo, es poca la diferencia entre el plazo 30h y 54h.

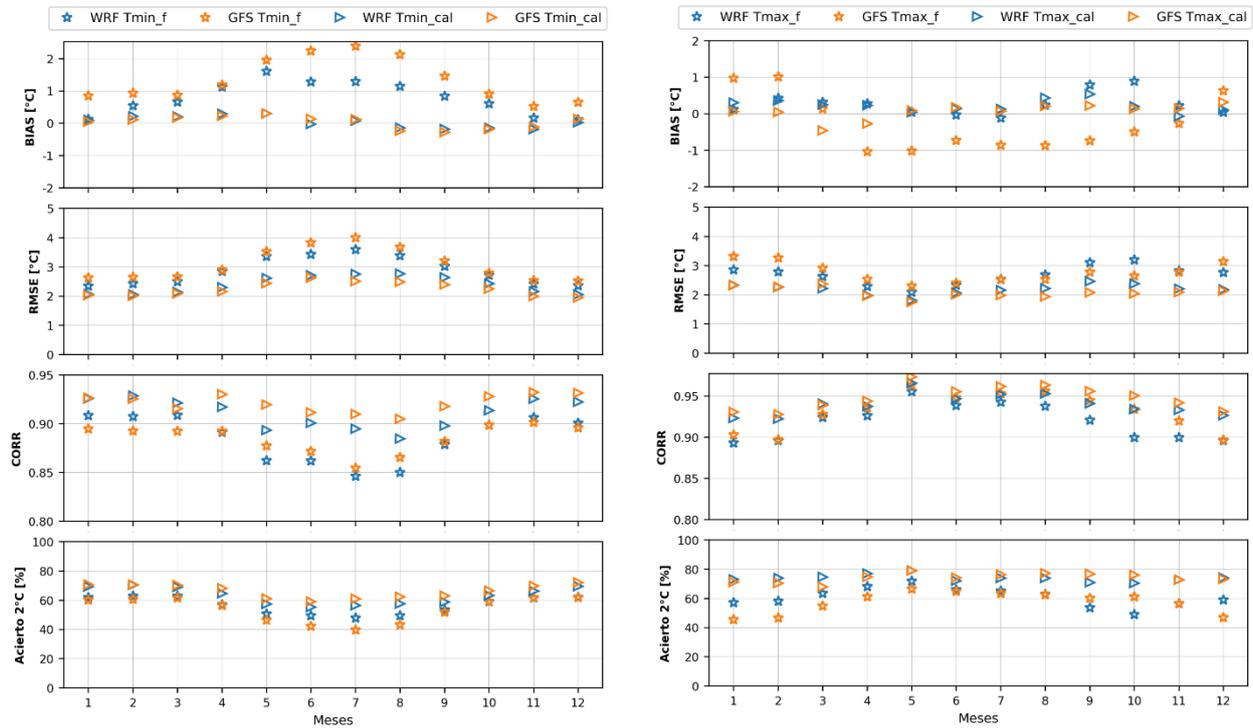


**Figura 6:** Diagramas de desempeño de PP24 para el SAP.SMN-DET (izq.) y GFS (der.) para distintos umbrales (ciclo 06Z) para los plazos 30h (triángulos) y 54h (círculos).

### 3.1.2 Temperaturas mínimas y máximas diarias

La evolución media mensual en el año de las temperaturas mínimas ( $T_{min\_f}$ ) y máximas diarias ( $T_{máx\_f}$ ) pronosticadas se puede ver en la Figura 7. Las  $T_{min}$  pronosticadas por ambos modelos para el plazo día+1 muestran una sobrestimación para casi todos los meses del año salvo para el periodo que va de agosto a noviembre donde se observa una leve subestimación. Los errores se encuentran entre los 2 y 3°C siendo mayores en los meses de invierno (mayo-agosto) aunque no superan los 4°C. Los valores calibrados ( $T_{mín\_cal}$ ) corrigen la sobrestimación y mantienen una diferencia de error de aproximadamente 1°C respecto de los valores sin calibrar. Los valores de correlación entre los pronósticos y observaciones se mantienen superiores a 0.8 para todo el año. El porcentaje de acierto supera el 60% para las  $T_{mín\_cal}$  en los meses de verano.

En el caso de las temperaturas máximas, el ciclo anual se comporta en forma inversa al de las  $T_{min}$ . Esto se ve en la curva del BIAS donde hay una leve sobrestimación de los pronósticos en los meses más fríos (may-oct) que, de acuerdo a los valores de RMSE, ronda los 2°C para las temperaturas calibradas. Asimismo, es en estos meses, donde la calibración tiene más impacto lo que se refleja en los porcentajes de acierto que alcanzan valores superiores a los de la  $T_{mín}$  de entre 70 y 80%.

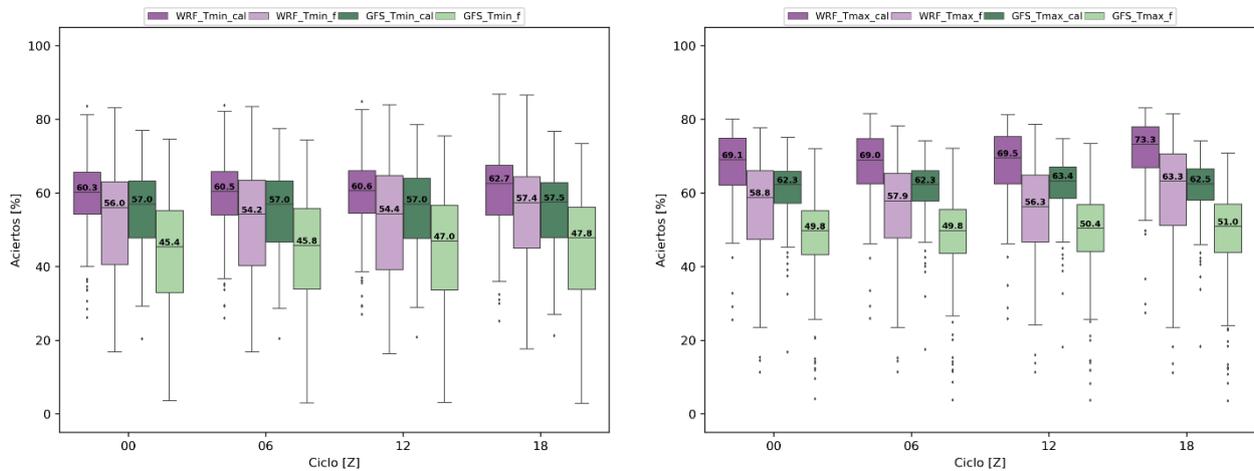


**Figura 7:** Evolución anual del BIAS, RMSE, el coeficiente de correlación lineal de Pearson y porcentaje de acierto para  $T_{\min}$  (izq.) y  $T_{\max}$  (der.) calibradas y sin calibrar (ciclo 06Z, plazo día+1).

En la Figura 8 se muestra la distribución del porcentaje de acierto para los 4 ciclos de pronóstico de las temperaturas mínimas y máximas calibradas y sin calibrar para el plazo día+1. Lo primero que se destaca es que el ciclo de 18Z muestra los mejores desempeños tanto para  $T_{\min}$  como para  $T_{\max}$  pudiendo responder a que este ciclo es el más cercano a la hora de las observaciones. El SAP.SMN-DET muestra mejores desempeños que el GFS para ambas variables, incluso para aquellas sin calibrar, aunque se ve que la calibración tiene más impacto en las  $T_{\max}$ .

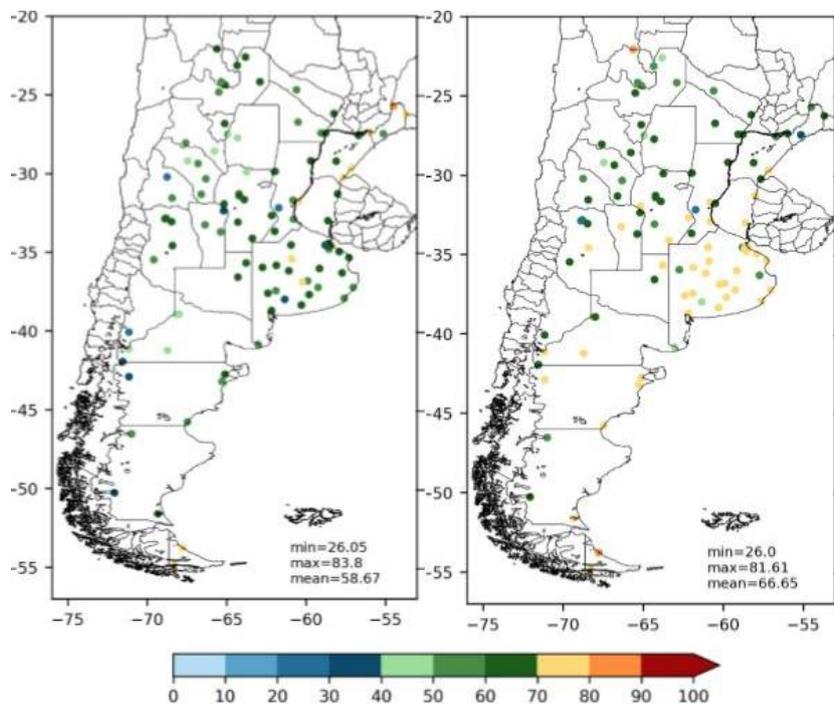
Para ese mismo ciclo, el porcentaje de acierto de las  $T_{\min\_cal}$  del SAP.SMN-DET supera en aproximadamente 6% el del GFS mientras que para  $T_{\max\_cal}$  esta diferencia puede llegar a alcanzar aproximadamente hasta el 11% de mejora. En líneas generales, para el día+2, se ve que el acierto disminuye un 4% en el caso de las  $T_{\min\_cal}$  y del 7% en el caso de las  $T_{\max\_cal}$ .

Cabe mencionar que la calibración logra su mayor impacto en el SAP.SMN-DET en el ciclo de 12Z siendo alrededor del 10% para las temperaturas máximas del 3.7% para las temperaturas mínimas (no se muestra).



**Figura 8:** Boxplots del porcentaje de acierto de las Tmin (izq.) y Tmax (der.) para el plazo día+1. Los valores dentro de las cajas indican la mediana de la distribución.

La distribución espacial de estos resultados para el SAP.SMN-DET (Figura 9) revela que en el caso de las Tmin\_cal, no se destaca una región con valores máximos de porcentaje de acierto, sino que se mantienen hasta el 70% en casi todas las estaciones del país. Mientras que las Tmax\_cal los máximos desempeños se encuentran en la región centro del país, en la provincia de Buenos Aires y zona norte de la Patagonia con valores de entre 70 y 80%. En la región del extremo norte del país como en las estaciones que están en zonas de topografía, los pronósticos resultan más desafiantes. En particular, los pronósticos de Tmin\_cal del SAP.SMN-DET de estaciones como Jachal (San Juan), Chapelco (Mendoza) o El Bolsón (Río Negro) presentan RMSE superiores a 5°C mientras que para las Tmax\_cal los RMSE no superan los 3.5°C en todo el país (no se muestra).

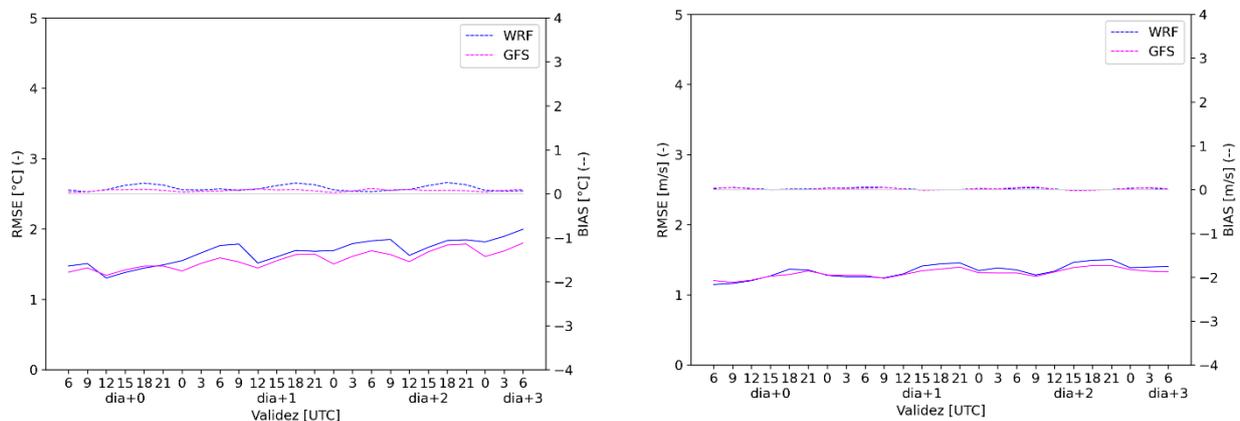


**Figura 9:** Mapas de porcentaje de acierto del SAP.SMN-DET para el día+1 de la temperatura mínima calibrada (izq.) y máxima calibrada (der.) (ciclo 06Z). En la esquina inferior derecha se indican los valores mínimos, máximos y medios para el total de estaciones.

### 3.1.3 Temperatura a 2m y magnitud de viento a 10m

En esta sección se muestran algunos resultados del desempeño en función del plazo de las variables horarias como temperatura a 2m y magnitud de viento a 10m calibradas. Se puede ver en la Figura 10 (panel izq.) el valor de la mediana del BIAS y RMSE sobre todas las estaciones del país en función de la validez. En líneas generales, la T2cal muestra una muy leve sobrestimación para todos los plazos de pronóstico con un error medio que ronda entre los 1.5 °C y 2°C hacia el final del plazo de pronóstico. Si bien ambos modelos se comportan de manera similar, el SAP.SMN-DET muestra un RMSE levemente mayor que GFS en las primeras horas de la mañana coincidentemente con las horas donde se registran la menor cantidad de observaciones (no se muestra).

Respecto de la magnitud del viento a 10m calibrado (panel der.), su desempeño también es levemente superior al GFS presentando un valor de BIAS casi nulo para ambos modelos y un error inferior a 1.5 m/s.



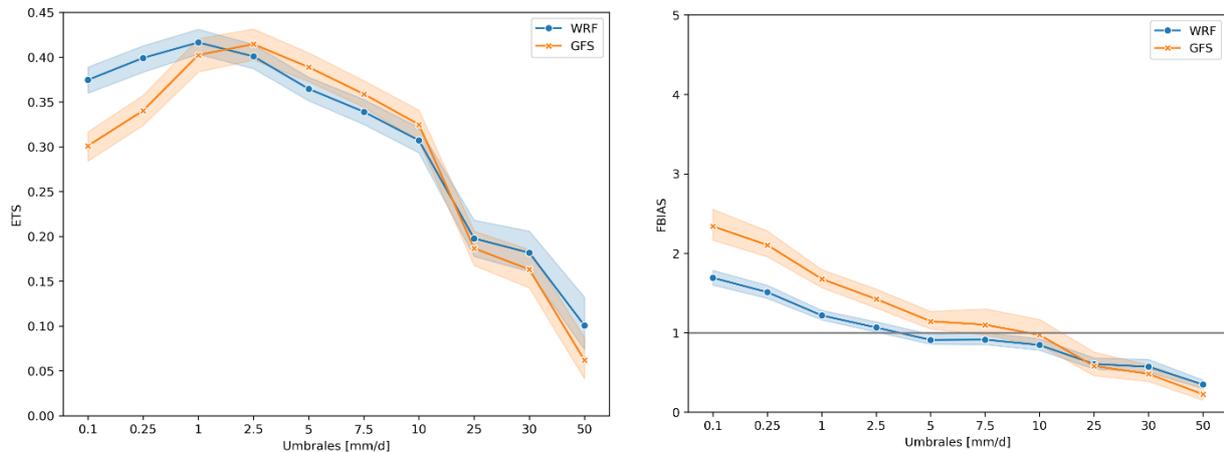
**Figura 10:** Serie de RMSE y BIAS de la T2m calibrada (izq.) y de magnitud del viento a 10m calibrada (der.) para SAP.SMN-DET y GFS (ciclo de 06Z).

## 3.2 SAP.SMN-ENS

En esta sección se analizan los resultados de la verificación de los pronósticos producidos por la componente probabilística del SAP.SMN. Se presentan resultados que muestran el comportamiento del ensamble en su conjunto y, en algunas ocasiones, se realiza un análisis de los miembros individuales.

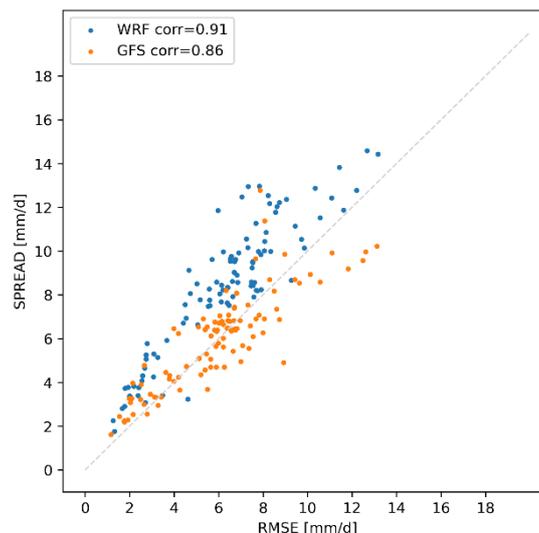
### 3.2.1 Precipitación

La Figura 11 muestra la distribución de ETS de las estaciones computadas con la media del ensamble (panel izquierdo). En sombreado se muestra el conjunto de valores de ETS calculados para todas las estaciones del país y en línea más gruesa el valor medio de esa distribución. Se puede ver que el ETS medio del SAP.SMN-ENS supera el valor de 0.4 para los umbrales menores a 2.5 mm en tanto que para umbrales superiores a 25 mm también se observa un mejor desempeño del SAP.SMN-ENS frente a GEFS. Por otra parte, a partir de los valores de FBIAS (panel derecho) ambos modelos sobrestiman el valor observado, aunque para umbrales menores a 25 mm, el SAP.SMN-ENS presenta un desempeño levemente mejor que el GEFS.



**Figura 11:** Serie de ETS (izq.) y Frequency BIAS (der.) de los pronósticos probabilísticos de PP24 para el SAP.SMN-ENS y GEFS computados con la media del ensamble para todas las estaciones se muestran en sombreado (ciclo de 06Z, válido para t+30h). La línea más gruesa indica el valor medio del conjunto de valores de los estadísticos.

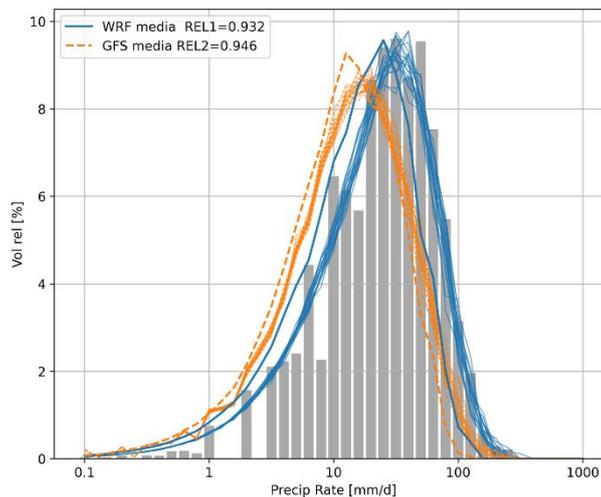
A continuación, se analiza la relación entre el spread y el RMSE de la media del ensamble para el SAP.SMN-ENS y GEFS. En un ensamble ideal, donde todos los miembros son equiprobables, la incertidumbre en torno a la media queda representada por el spread. Por lo que se necesitan grandes (pequeñas) dispersiones para capturar eventos menos (más) predecibles donde el error de la media y la observación es mayor. Por lo tanto, se espera que el spread y el RMSE sean comparables en cuanto a que la dispersión del ensamble logre capturar la incertidumbre de los pronósticos (Fortín, 2014). En la Figura 12, se puede ver que, en líneas generales, las estaciones del SAP.SMN-ENS presentan valores de spread mayores que el error lo que implica una sobrestimación de la incertidumbre y un ensamble que resulta sobre confiado, sin embargo, hay una mejor correspondencia que para GEFS. Las estaciones con mayor spread se encuentran en el centro norte del país donde la precipitación media también resulta máxima (no se muestra).



**Figura 12:** Diagrama de dispersión que muestra relación entre el SPREAD y RMSE de los pronósticos probabilísticos de PP24 para SAP.SMN-ENS y GEFS (ciclo de 06Z, válido para t+30h). Se agrega en el recuadro el valor del coeficiente de correlación lineal de Pearson.

En la Figura 13 se exploran las distribuciones de probabilidad del volumen de precipitación (PDF) del SAP.SMN-ENS y GEFS para cada uno de los miembros y las medias correspondientes. Dichas curvas indican el porcentaje de la precipitación total explicado en cada intervalo de lluvia (volumen relativo de precipitación) mientras las barras grises muestran la distribución de precipitación observada. Se puede ver que para el SAP.SMN-ENS las distribuciones de precipitación de los miembros presentan mayor correspondencia con la distribución observada, mientras que las curvas de precipitación volumétrica de los miembros del GEFS quedan desplazadas hacia las tasas más bajas y donde no se logran capturar los máximos observados. La menor dispersión ocurre para las precipitaciones más débiles mientras que para la cola derecha de la distribución, la diferencia entre los miembros es mayor.

Por otra parte, considerando las medias del ensamble, se puede ver que las distribuciones no capturan la forma de distribución observada quedando desplazadas hacia los valores de precipitación más débiles. En este sentido, la mayor incertidumbre se traduce en una mayor cantidad de miembros que pronostican precipitaciones cercanas a cero reduciendo así el valor de la media pronosticada, y corriendo el máximo de la distribución hacia tasas más bajas. Esto evidencia las limitaciones de verificar la precipitación pronosticada por un ensamble a partir de su media.



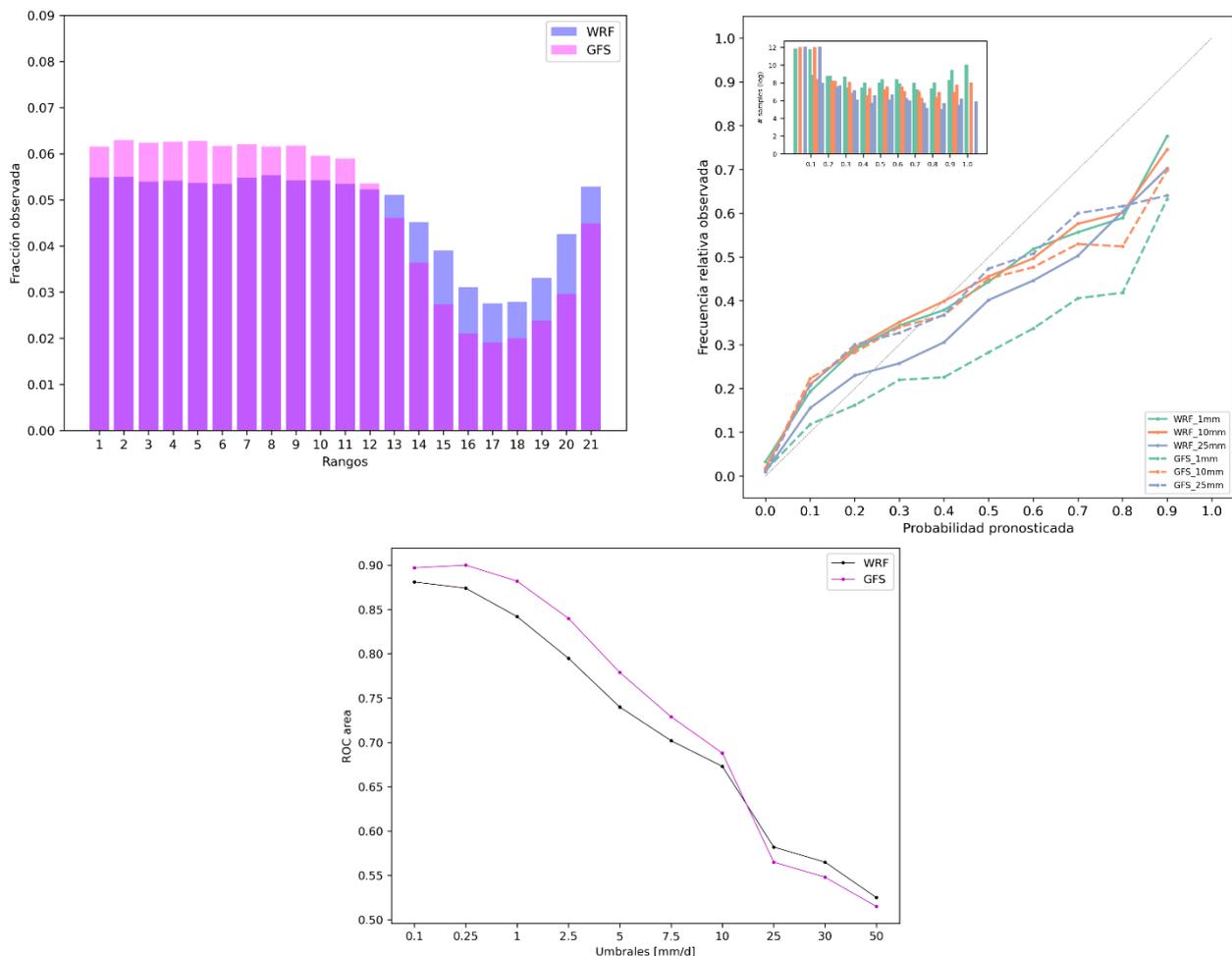
**Figura 13:** PDFs volumétricas de la PP24 para los miembros (líneas finas) y medias del ensamble (líneas gruesas) del SAP.SMN-ENS (azul) y GEFS (naranja) y distribución del volumen de precipitación de las observaciones (barras grises) válidas para el día 0 (ciclo 06Z, plazo  $t+30h$ ). En el cuadro se indican los valores totales de precipitación observada y pronosticada considerando el total de estaciones y la relación entre el total pronosticado respecto al observado para cada miembro.

El histograma de rangos resulta útil para determinar la agudeza del ensamble (Talagrand y otros, 1997; Hamill, 2001). Un ensamble perfecto mostraría un histograma “chato” donde los valores observados quedan repartidos en forma equiprobable entre los miembros por lo que la dispersión del ensamble logra representar la variabilidad de las observaciones. En la Figura 14 (panel superior izquierdo) se pueden ver los histogramas de rangos para el SAP.SMN-ENS y GEFS normalizados por la cantidad de observaciones en cada rango y donde fueron considerados los valores de precipitación superiores a 0.01 mm. Se puede observar que existe una asimetría en la distribución de las frecuencias observadas y que preferentemente, se ubican en los extremos de las clases más débiles o moderadas, mostrando que existe un sesgo sistemático en el conjunto y que resulta subdispersivo. Un comportamiento similar se observa con la distribución de precipitación del GEFS lo que puede sugerir que las condiciones iniciales y de borde provistas por el ensamble global de menor resolución tengan un impacto directo en la representatividad de la incertidumbre del

SAP.SMN-ENS. En líneas generales, el SAP.SMN-ENS muestra menos sesgo hacia los extremos por lo que resulta más confiable que el GEFS.

El diagrama de confiabilidad muestra el grado de correspondencia entre las probabilidades pronosticadas de un evento con las frecuencias observadas. Es un indicador de cuán frecuente la probabilidad de un pronóstico realmente ocurrió. En el panel superior derecho de la Figura 14 se puede ver que, en el caso del SAP.SMN-ENS los umbrales de 1 y 10 mm presentan un comportamiento similar subestimando las probabilidades de hasta el 40% mientras que, para probabilidades mayores, sobrestima las frecuencias observadas. En cambio, el umbral de 25 mm muestra una sobrestimación para probabilidades mayores al 20%. En cambio, en el caso del GEFS hay una clara sobrestimación para el umbral de 1 mm indicando que sobrestima la frecuencia de los eventos observados. Sin embargo, para umbrales superiores el ensamble muestra ser más agudo.

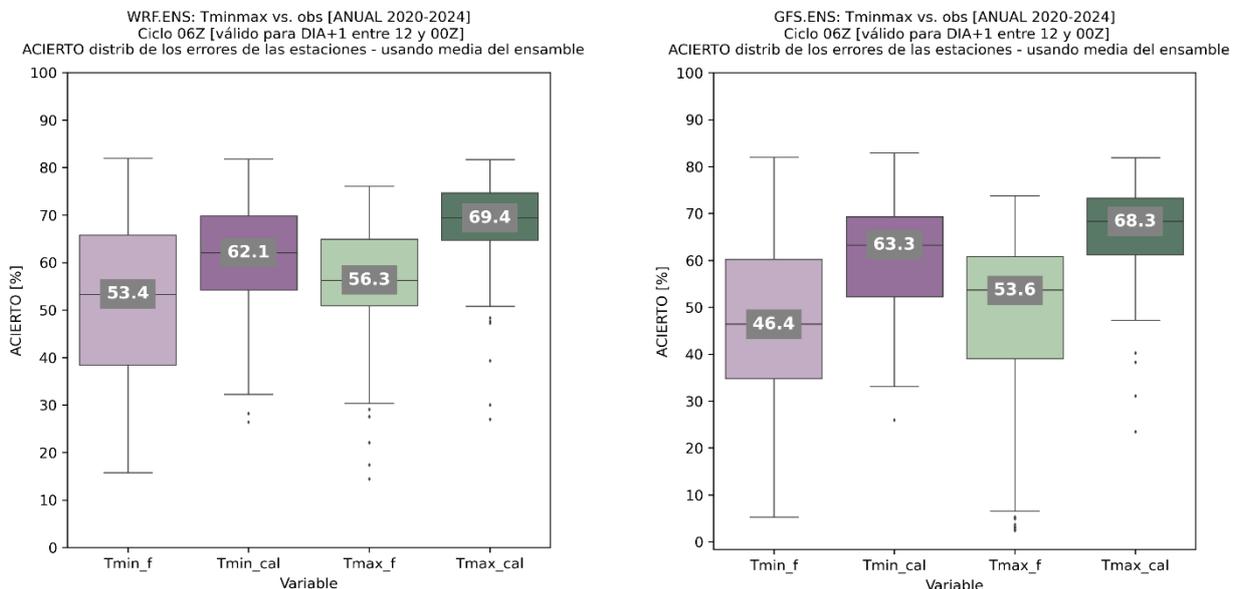
Complementariamente, el área de ROC (Figura 14 panel inferior) muestra la capacidad de los ensambles en predecir eventos por sobre un umbral, en este caso se ve que ambos ensambles presentan valores mayores áreas de ROC mayores a 0.5 (este valor indica que se pronostica igual cantidad de hits como de falsas alarmas) indicando que resultan útiles para pronosticar eventos en todos los umbrales. Como es de esperar, los ensambles pierden habilidad para los eventos más intensos, sin embargo, el SAP.SMN-ENS resulta más preciso que el GEFS para los eventos que superan 25mm.



**Figura 14:** Histograma de rangos para la PP24 (arriba izq.) normalizado tal que la suma de los rangos es 1. Se consideraron valores de PP24 superiores a 0.01mm. Diagrama de confiabilidad (arriba der.) para los umbrales 1, 10 y 25mm (ciclo 06Z, plazo t+30h). Área de ROC en función de umbrales (abajo).

### 3.2.2 Temperaturas mínimas y máximas diarias

La Figura 15 muestra el porcentaje de acierto de las temperaturas mínimas y máximas pronosticadas calibradas y sin calibrar. Cada caja contiene los valores medios sobre el total de estaciones y para el cómputo del porcentaje de acierto se utilizó la media del ensamble. Se agrega en el recuadro gris central el valor de la mediana de la distribución. Para el SAP.SMN-ENS (panel izq.) se puede ver que la calibración aumenta en aproximadamente 9% el porcentaje de acierto en el caso de las T<sub>mín</sub> mientras que en el caso de las T<sub>máx</sub> representa una mejora de aproximadamente 13% con valores de acierto cercanos al 70%. En el caso del GEFS (panel der.), también se ve una mejora para las variables calibrados, sin embargo, excepto para la T<sub>mín</sub> sin calibrar, los porcentajes de acierto son inferiores que para el SAP.SMN-ENS.



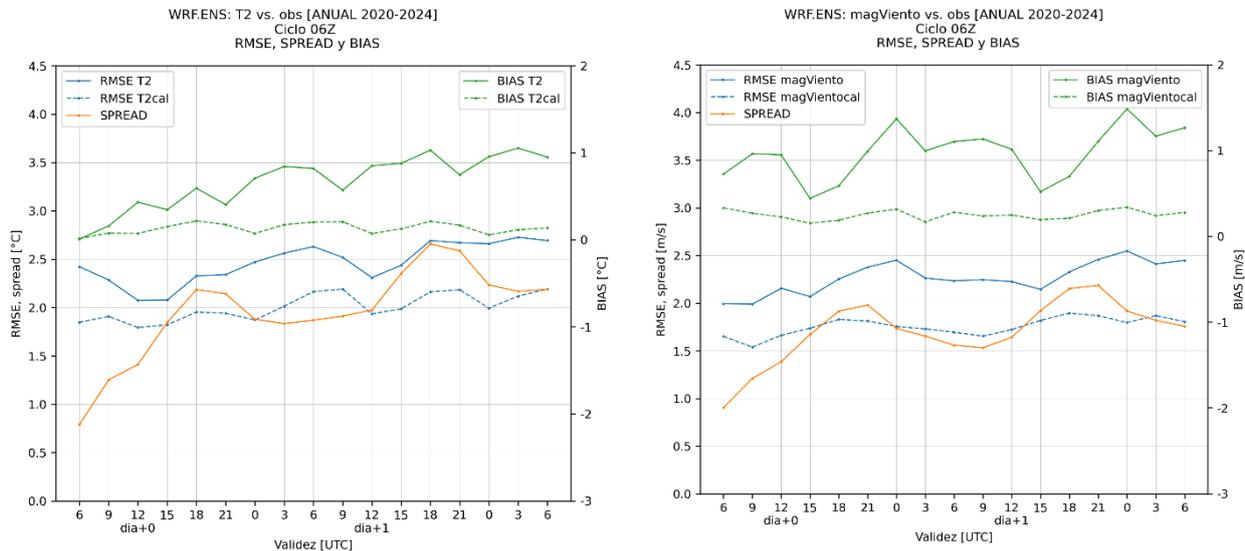
**Figura 15:** Boxplots del porcentaje de acierto de las T<sub>mín</sub> y T<sub>máx</sub> calibradas y sin calibrar computado con las medias del ensamble para SAP.SMN-ENS (izquierda) y GEFS (derecha). El valor indicado dentro de la caja corresponde a la mediana de la distribución (ciclo 06Z, día+1).

### 3.2.3. Temperatura a 2m y magnitud de viento a 10m

En cuanto al análisis de los pronósticos horarios de las variables de superficie en función del plazo podemos ver en la Figura 16 la variabilidad del BIAS y la relación entre el RMSE y SPREAD para las variables calibradas y sin calibrar. La T<sub>2m</sub> (panel izquierdo) muestra que, la calibración reduce el RMSE y la sobreestimación, por lo que el SPREAD alcanza magnitudes similares al error indicando que el ensamble logra representar la incertidumbre observada. Sin embargo, toma valores máximos en horas de la tarde, lo cual podría estar asociado al comportamiento de la capa límite lo que hace que el ensamble se torne sobredispersivo.

De manera análoga, la magViento (panel derecho) calibrada logra disminuir la sobreestimación. El SPREAD alcanza valores cercanos o superiores al error luego de la hora 12 de plazo lo que permite

representar la incertidumbre de las observaciones, y en comparación con T2m, el RMSE tiene un aumento menor con el plazo, pero con valores de SPREAD más bajos.



**Figura 16:** Series de RMSE, SPREAD y BIAS de la T2 (izq.) y de la magViento (der.) del SAP.SMN-ENS (ciclo 06Z).

## 4. CONCLUSIONES

Este informe recopila los resultados de la verificación anual del periodo comprendido entre los años 2020 y 2024 de los pronósticos determinísticos y probabilísticos de alta resolución generados por el sistema SAP.SMN. En particular, se analizaron las variables de precipitación acumulada en 24hs, temperatura a 2m y magnitud de viento a 10m (calibradas y sin calibrar), temperatura diaria máxima y mínima calibradas y sin calibrar. En la medida de lo posible, se realizó una comparación con los pronósticos del modelo de menor resolución GFS. A modo representativo se presentaron los resultados para el ciclo de 06Z. Se utilizaron los datos observados provenientes de las estaciones de superficie de la red de estaciones operativas del SMN.

Respecto de la componente determinística SAP.SMN-DET, los pronósticos de PP24 muestran una subestimación media en el volumen total en todo el periodo, aunque el SAP.SMN-DET muestra una mejor correspondencia con la distribución de precipitación que el GFS en las tasas más altas. El frequency BIAS también muestra un mejor desempeño del WRF frente al GFS principalmente en los umbrales iguales o superiores a 5mm. En cuanto a las temperaturas mínimas y máximas diarias, el SAP.SMN-DET muestra mejores desempeños (plazo dia+1) en los 4 ciclos, con mayor impacto de la calibración sobre la Tmax con una mejora del porcentaje de acierto que llega al 11% entre la variable sin calibrar y calibrada (para 12Z, plazo dia+1). Los porcentajes de acierto superiores al 70% se ven en las Tmax\_cal en la región central y algunas estaciones costeras de la Patagonia mientras que la Tmin\_cal muestra un desempeño más parejo en todo el país. Por último, la T2cal queda sobreestimada para todos los plazos de pronóstico con RMSE menores de 2°C y la magVientocal también muestra una leve sobreestimación con errores que rondan los 1.5m/s para todos los plazos.

En cuanto al desempeño del SAP.SMN-ENS, los resultados del ETS para la media del ensamble de los pronósticos de PP24 muestra un mejor desempeño que para el GEFS en los umbrales menores a 2.5 y mayores a 25 mm. Si bien el SAP.SMN-ENS resulta subdispersivo, se ve una mejor correspondencia entre el RMSE y el spread que para GEFS. Para los umbrales de 1 y 10 mm se observa una subestimación de las

probabilidades mientras que para umbrales mayores a 25 mm este comportamiento se revierte. Las distribuciones de probabilidad volumétrica muestran para el SAP.SMN-ENS una mejor correspondencia de todos los miembros a la distribución de precipitación observada que en el caso de GEFS. La calibración de las temperaturas aumenta en aproximadamente 9% el porcentaje de acierto en el caso de las  $T_{mín\_cal}$  llegando a valores cercanos al 62%, mientras que en el caso de las  $T_{máx}$  representa una mejora de aproximadamente 13% con valores superiores al 70%.

Todos estos resultados nos impulsan a continuar avanzando en el desarrollo de mejoras del SAP.SMN. En este sentido, desde diciembre de 2024 se encuentra implementada en forma operativa la componente de asimilación de datos regional con medio de la cual se proveen condiciones iniciales y de borde que cuentan con información actualizada de distintas fuentes locales de observación, entre ellas de la red nacional de radares. A futuro, se ampliará el análisis presentado en esta nota técnica con los pronósticos inicializados con análisis locales que incluyan asimilación de datos. Por otra parte, en el caso de la precipitación, se explorará el uso de métricas estadísticas que consideren la variabilidad espacial de modo de que los resultados no queden afectados por la condición de "doble penalización" como cuando son computados punto a punto. Por último, se explorará el uso de otras fuentes de información observada como estimaciones satelitales de precipitación o reanálisis de otros modelos de pronóstico que permitan un estudio adecuado análisis en función de la resolución de los pronósticos.

## 5. REFERENCIAS

Casaretto G., Dillon M.E., Garcia Skabar Y., Ruiz J., Sacco M. 2023. Ensemble Forecast Sensitivity to Observations Impact (EFSOI) applied to a regional data assimilation system over south-eastern South America. *Atmos. Res.*, Vol 295, 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106996>

Chen, S.H. and W.Y. Sun, 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80(1), 99–118. DOI: <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.99>.

de Elía R., L. Vidal, P. Lohigorry, R. Mezher y M Rugna, 2017: La red Argentina de radares meteorológicos de Argentina. Nota Técnica SMN 2017-39.

Dillon M.E., Maldonado P., Corrales P., García Skabar Y., Ruiz J.J., Sacco M., Cutraro F., Mingari L., Matsudo C., Vidal L., Rugna M., Hobouchian M.P., Salio P., Nesbitt S., Saulo C., Kalnay E., Miyoshi T. 2021. A Rapid Refresh ensemble based Data Assimilation and Forecast system for the RELAMPAGO field campaign. *Atmos. Res.*, Vol 264, 19p <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105858>

Dillon, M.E., Matsudo, C., Y. García Skabar, M. Sacco y M. Alvarez Imaz, 2020: Implementación del sistema de pronóstico numérico en el HPC: Configuración del ensamble. Nota Técnica SMN 2020-79.

Dillon M.E., Y. Garcia Skabar, J. Ruiz, E. Kalnay, E.A. Collini, P. Echevarría, M. Saucedo, T. Miyoshi, M. Kunii; 2016. Application Of The WRF-LETKF Data Assimilation System over Southern South America: Sensitivity to model physics. *Wea. and For.*, vol. 31, no 1, p 217-236. <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-14-00157.1>

Feng J., Sun J., Zhang Y., 2020: A dynamic blending scheme to mitigate large-scale bias in regional models. *J. of Advances in Modeling earth Systems*, vol 12, n 3, <https://doi.org/10.1029/2019MS001754>

Fortin, V., Abaza, M., Anctil, F., Turcotte, R., 2014. Why should Ensemble Spread Match the RMSE of the Ensemble mean? *J. Hydrometeorol.* 15, 1708–1713. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0008.1>

Gilleland, E., D. Ahijevych, B. G. Brown, B. Casati, and E. E. Ebert, 2009: Intercomparison of Spatial Forecast Verification Methods. *Wea. Forecasting*, 24, 1416–1430, <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222269.1>.

Greybush, S. J., E. Kalnay, T. Miyoshi, K. Ide, y B. R. Hunt, 2011: Balance and ensemble Kalman filter localization techniques. *Monthly Weather Review*, 139 (2), 511-522. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3328.1>

- Hunt, B. R., Kostelich, E. J., & Szunyogh, I. (2007). Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2), 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2006.11.008>
- Hobouchian, M. P., G. Díaz, L. Vidal, Y. García Skabar, L. Ferreira, M. Maas, M. S. Rossi Lopardo, H. Veiga y M. Rugna, 2021: Ajuste de la estimación de precipitación satelital IMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105.
- Hong, S.Y., Kim, J.H., Lim, J.o., Dudhia, J., 2006a. The WRF single moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *J. Korean Meteorol. Soc.* 42, 129–151.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006b. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Mon. Weather Rev.* 134, 2318–2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Iacono, y coautores, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Janjic, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- Maldonado P., Dillon M.E., Garcia Skabar Y., Guerrieri J.M., Sacco M., Ruiz J., 2022. Sistema de asimilación y pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente experimental, características y ajustes. CONGREGMET XIV
- Maldonado, Paula Soledad; Ruiz, Juan Jose; Saulo, Andrea Celeste, 2020: Parameter sensitivity of the WRF-LETKF system for assimilation of radar observations: Imperfect-model observing system simulation experiments; *American Meteorological Society; Weather and Forecasting*; 35; 4; 5-2020; 1345-1362, <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-19-0161.1>
- Matsudo C., Y. Garcia Skabar, 2023: Verificación de los pronósticos del Sistema de Asimilación y Pronóstico numérico del SMN para el período 2020-2022. Nota Técnica SMN 2023- 145.
- Matsudo C., García Skabar Y., Righetti S., Cutraro F., Sacco M. Dillon M.E., Alvarez Imaz M., Maldonado P., Salles A., 2022a. Sistema de asimilación y pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: componente operativa. CONGREGMET XIV
- Miyoshi T. y M. Kunii, 2012a: The local ensemble transform Kalman filter with the Weather Research and Forecasting Model: Experiments with real observations. *Pure Appl. Geophys.*, 169, 321–333, <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0373-4>
- Miyoshi, T., Kunii, M., 2012b. Using AIRS retrievals in the WRF-LETKF system to improve regional numerical weather prediction. *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 64, 18408. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.18408>
- Niu, G.Y., y coautores, 2011: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015140>
- Qian, X., Wang Y, Chen Y, Min J, Li X, 2024: Blending of global and regional ensembles in cycling hybrid ensemble-variational data assimilation for the convection-permitting prediction of typhoon Merbok (2017). *Atmos. Research*, vol 307.
- Righetti, S., F. Cutraro, Y. García Skabar y M. Sacco, 2024: Calibración de los pronósticos de precipitación acumulada diaria. Nota Técnica SMN 2024-164.
- Shin, H.H., and S.Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 250-271. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00116.1>



Skamarock, W., J. Klemp, J. Dudhi, D. Gill, Z. Liu, J. Berner, X.Y. Huang, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145(145), 550.

Whitaker J.S. y T. M. Hamill, 2012: Evaluating methods to account for system errors in ensemble data assimilation. *Monthly Weather Review*, 140, 3078–3089.

Yañez D., Dillon M.E., Maldonado P., García Skabar Y., 2024. Verificación de pronósticos por ensamble en alta resolución generados a partir del sistema de asimilación de datos y pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional en dos casos de estudio. *Meteorológica*, en prensa, <https://doi.org/10.24215/1850468Xe034>

Zhou, X., Zhu, Y., Hou, D., Luo, Y., Peng, J., Wobus, R., 2017. Performance of the New NCEP Global Ensemble Forecast System in a parallel Experiment. *Weather Forecast.* 32, 1989–2004. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0023.1>

## ANEXO I: Métricas de verificación

### Media del ensamble

$$\bar{P} = \frac{\sum_i^M P_i}{M}$$

donde M es la cantidad de miembros del ensamble y P los pronósticos. Es una medida afectada por los valores extremos. No representa a ninguno de los miembros del ensamble.

### Spread medio del ensamble

$$SPREAD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M (P_{k,i} - \bar{P}_k)^2}$$

donde M es la cantidad de miembros del ensamble,  $P_i$  representa la media del ensamble,  $P_{k,i}$  es el i-ésimo miembro con  $i \in \{1, \dots, M\}$  y N representa la cantidad de valores de la muestra, por ejemplo, puntos de retícula. Se denomina dispersión media del ensamble (spread) a la medida que indica la variabilidad de los miembros dada por la distancia media de los miembros al valor de la media del ensamble. Cabe mencionar que la magnitud del spread queda sujeta a los valores medios de la variable. Se utiliza en comparación con el RMSE computado con la media del ensamble para medir la incertidumbre del conjunto (Fortín, 2014).

### Error cuadrático medio (RMSE)

Medida de las diferencias cuadráticas del valor medio de los errores de los pronósticos. En el caso del ensamble, se computa utilizando la media del ensamble o los miembros en forma individual. Su valor varía entre cero e infinito  $(0; \infty)$ .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$$

donde P son los pronósticos, O las observaciones y N el total de puntos considerado en el análisis.

### Distribución de probabilidad volumétrica (PDF) de precipitación

Las distribuciones de probabilidad del volumen de precipitación (Amitai y otros, 2012), subdividen la tasa de precipitación diaria en intervalos en escala dBR, y consideran la contribución relativa de los mismos al volumen total de precipitación. Se definen como la suma de las tasas de precipitación para un dado intervalo en escala dBR ( $dBR = 10 \log(R/1 \text{ mmdía}^{-1})$ ;  $[R] = [\text{mmdía}^{-1}]$ ) dividido por la suma total de las tasas de precipitación. La ventaja respecto a las PDFs de ocurrencia es que son menos sensibles a las limitaciones en la detección de precipitación débil (asociada a una pequeña fracción de la precipitación total). En la leyenda de las Figuras, se incluye la relación entre la precipitación total pronosticada y observada sobre la región y período analizado. Estas Figuras se muestran para la PPacum24h pronosticada con el ciclo 06Z y válida para el día 0 y día+1 a las 12Z.

## Diagrama de confiabilidad

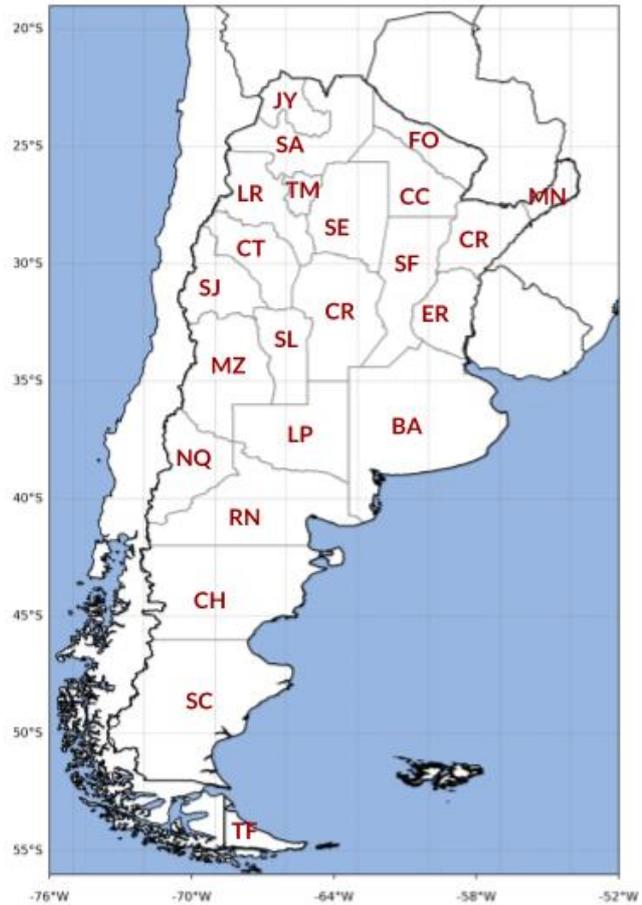
El diagrama de confiabilidad muestra las probabilidades pronosticadas en función de las frecuencias observadas donde el rango de los valores de los pronósticos se divide en B intervalos de probabilidad (por ejemplo, 0-5%, 5-15%, 15-25%, etc.). Mide la correspondencia entre las probabilidades pronosticadas de un evento y las frecuencias observadas.

La confiabilidad queda representada por la proximidad de la curva a la diagonal. La distancia a la curva indica el bias condicional. Si la curva se encuentra por debajo de la diagonal indica que el pronóstico sobrestima (las probabilidades son muy altas); mientras que si la curva queda por encima indica subestimación (las probabilidades son muy bajas). Cuanto más chata es la curva, menos resolución tiene. Un pronóstico climatológico no discrimina la ocurrencia o no de eventos por lo que su resolución es cero. La frecuencia de los pronósticos en cada intervalo de probabilidad (en el histograma) muestra la agudeza del sistema de pronóstico. Cabe destacar que este diagrama queda condicionado a la muestra de pronósticos.

## ANEXO II

**Tabla II:** Listado de abreviaturas de las provincias de Argentina usadas en la Figura 8 y su ubicación.

Abreviatura	Provincia
BA	Buenos Aires
LP	La Pampa
CB	Córdoba
SF	Santa Fe
ER	Entre Ríos
MN	Mendoza
CR	Corrientes
CC	Chaco
FO	Formosa
JY	Jujuy
SA	Santa Fe
SE	Santiago del Estero
TM	Tucumán
CT	Catamarca
LR	La Rioja
SJ	San Juan
SL	San Luis
MZ	Mendoza
NQ	Neuquén
RN	Río Negro
CH	Chubut
SC	Santa Cruz
TF	Tierra del Fuego



## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martín Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).