

Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles

Nota Técnica SMN 2025-193

**Cynthia Matsudo¹, Paula Maldonado¹, María Eugenia Dillon^{1,2},
Gimena Casaretto¹, Maximiliano Sacco¹, Federico Cutraro¹,
Silvina Righetti^{1,3}, Milagros Alvarez Imaz¹, Yanina García Skabar¹,
Juan Ruiz^{1,3,4}, Soledad Osores¹**

¹Dirección de Productos de Modelación Ambiental y Sensores Remotos, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, Servicio Meteorológico Nacional (DPMAYSR-DNCIPS-SMN)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO-FCEN-UBA)

⁴Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-UBA/CONCIET)

Febrero 2025



**Ministerio
de Defensa**
República Argentina

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 probabilísticos del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN) durante un período de estudio de aproximadamente 2 meses en el año 2023. En particular, se compara el impacto de la condición inicial en el desempeño de los pronósticos, considerando para ello análisis regionales generados mediante el sistema de asimilación de datos LETKF-WRF y análisis globales de un modelo de menor resolución. Los resultados obtenidos muestran que el impacto positivo de inicializar los pronósticos probabilísticos a partir de análisis regionales se encuentra limitado a regiones específicas del país y a las primeras horas de pronóstico, particularmente para el pronóstico de magnitud de viento a 10 metros, así como en la representación espacial de la precipitación.

Abstract

This Technical Note presents an evaluation of the performance of the Data Assimilation and Numerical Weather Prediction System of the National Meteorological Service of Argentina (SAP.SMN) probabilistic forecasts, during a 2-month period of 2023. Particularly, the impact of the initial condition on the forecasts is assessed considering regional analyses from the LETKF-WRF data assimilation system and global analyses from a lower resolution model. The results show that the positive impact of initializing the probabilistic forecasts with regional analyses is limited to specific regions of the country and to the first forecast hours, particularly for the 10 m wind magnitude and for the spatial representation of precipitation.

Palabras clave: SAP.SMN, LETKF-WRF, verificación, asimilación

Citar como:

Matsudo, C., P. Maldonado, M. E. Dillon, G. Casaretto, M. Sacco, F. Cutraro, S. Righetti, M. Alvarez Imaz, Y. García Skabar, J. Ruiz, S. Osore, 2025: Evaluación del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional: impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Nota Técnica SMN 2025-193.

PRÓLOGO

Esta Nota Técnica forma parte de una serie que recopila informes realizados en el marco de la implementación del sistema de pronóstico numérico en el sistema de cómputo de alta performance HPC, Huayra Muyu (HM), adquirido a través del proyecto CyT Alerta. Un mayor detalle del sistema de cómputo y del proyecto CyT Alerta se puede encontrar en de Elía y otros (2020).

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 un sistema de asimilación de datos basado en ensambles a partir de la técnica *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (LETKF; Hunt y otros, 2007) con el fin de agregar valor a los pronósticos regionales operativos mediante la inclusión de información de diferentes fuentes observacionales. El sistema WRF-LETKF ha sido evaluado en diferentes contextos, desde múltiples casos de estudio hasta su implementación experimental en tiempo real (Maldonado y otros, 2022; Yañez y otros, 2024).

El objetivo de esta nota técnica es evaluar el Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN), analizando el impacto de los análisis regionales en la inicialización del pronóstico por ensambles. Para ello, se compara el desempeño de los pronósticos probabilísticos inicializados a las 12 UTC a partir de un modelo global (implementación operativa hasta principios de diciembre de 2024) y a partir de los análisis regionales del WRF-LETKF (implementación operativa desde mediados de diciembre de 2024) durante un período de estudio de 65 días entre agosto y diciembre de 2023.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El SAP.SMN emplea 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. El SAP.SMN utiliza un ensamble multifísica de 20 miembros combinando 3 esquemas de capa límite planetaria y 2 esquemas de microfísica, dando lugar a un total de 6 combinaciones posibles (Dillon y otros, 2020). Los esquemas que parametrizan los procesos físicos subreticulares incluyen el modelo radiativo RRTMG (Iacono y otros, 2008), el modelo de suelo Noah-MP (Niu y otros, 2011), los esquemas de microfísica de un momento LIN (Chen y Sun, 2002) y WSM6 (Hong y otros, 2006a) y los esquemas de capa límite planetaria YSU (Hong y otros, 2006b), MYJ (Janjic, 1994) y Shin-Hong (Shin y Hong, 2015). Cabe destacar que dada la resolución horizontal empleada no se parametriza la convección.

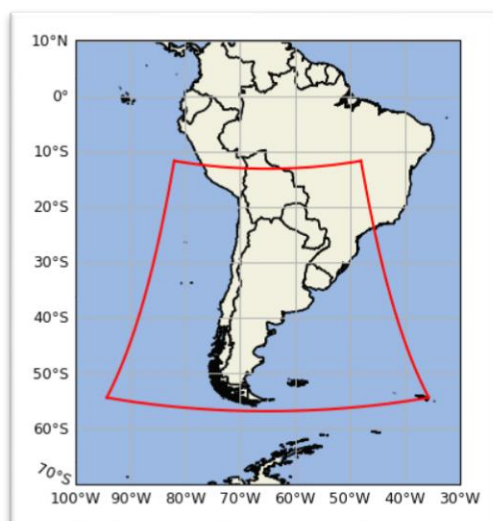


Figura 1: Dominio computacional del Sistema de Asimilación de datos y Pronóstico numérico del Servicio Meteorológico Nacional (SAP.SMN).

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.

A continuación, se describen las características particulares del sistema de asimilación de datos y del sistema de pronóstico numérico, así como también la metodología de verificación.

2.1. Sistema de asimilación de datos

El sistema de asimilación de datos del SAP.SMN emplea el método basado en ensambles *Local Ensemble Transform Kalman Filter* en su versión cuatridimensional (4D-LETKF; Hunt y otros 2007) acoplado con el modelo WRF. El sistema LETKF-WRF ha sido utilizado y testeado en nuestra región y a nivel mundial en múltiples contextos con resultados alentadores (ej. Miyoshi y Kunii, 2012a; Miyoshi y Kunii, 2012b; Dillon y otros, 2016; Maldonado y otros, 2020; Dillon y otros, 2021; Casaretto y otros, 2023).

El sistema WRF-LETKF permite generar un ensamble de 40 análisis regionales con frecuencia horaria, en el dominio computacional indicado en la Fig. 1. Se utiliza un esquema cíclico parcial con un *restart* cada 24 horas a las 18 UTC. Es decir que todos los días a esa hora se vuelve a inicializar el sistema a partir del modelo global, con el fin de que el modelo regional de alta resolución no diverja con el pasar de los días. Cabe destacar que existen metodologías que pueden aplicarse para brindarle al modelo regional información del modelo global en todo el dominio (no sólo en los bordes) sin necesidad de hacer un *restart*, las cuales serán exploradas en futuros experimentos (ej. Feng y otros, 2020; Qian y otros, 2024). El sistema emplea el método de inflación *relaxation-to-prior-spread* (RTPS; Withaker and Hamill, 2012) con un parámetro de inflación de 0.95 y el método de localización en R (Greybush y otros, 2011) con una escala de localización para las observaciones convencionales de 50 km en la horizontal y $0.4 \ln(p)$ en la vertical; de 7 km en la horizontal y 2 km en la vertical para las observaciones de radar.

Las observaciones asimiladas incluyen datos de temperatura y humedad a 2 metros, viento a 10 metros y presión de superficie provistos por estaciones de superficie convencionales (ADPSFC), automáticas (ADPAUT), en aeropuertos (AWOS) y a bordo de barcos (SFCSHP) y boyas (SFCEBUY); perfiles verticales de temperatura, viento y humedad relativa provistos por sondeos (ADPUPA); datos de temperatura y viento provistos por aviones (AIRCFT); estimaciones satelitales de perfiles verticales de temperatura y humedad provistos por el sensor AIRS (AIRSRT); viento sobre el océano a partir del sensor ASCAT (ASCATW); vectores de movimiento derivados a partir del satélite GOES-16 (G16DMW) y datos de reflectividad provistos por los radares de banda C (RADARC) de la red nacional de radares (de Elía y otros, 2017). La Figura 2 muestra a modo de ejemplo la distribución espacial de las mismas para diferentes ciclos del 01/11/2023.

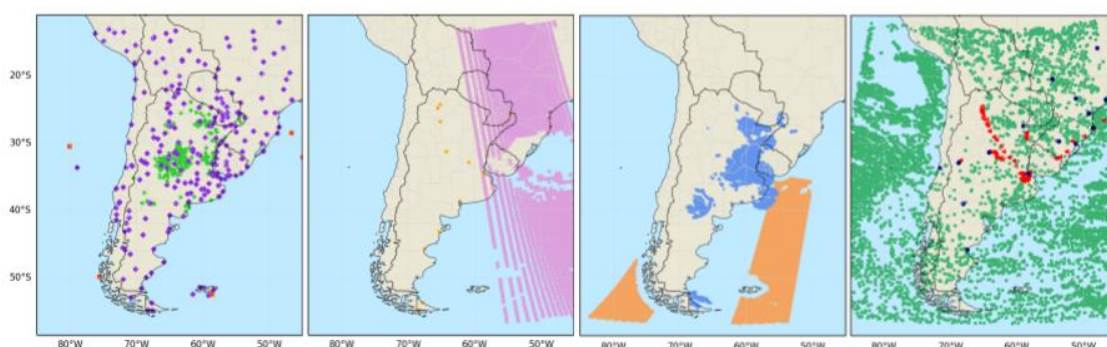


Figura 2: Distribución espacial de las observaciones asimiladas en diferentes ciclos el 01/11/2023. primer panel: estaciones de superficie convencionales (ADPSFC, violeta), automáticas (ADPAUT, verde) y a bordo de barcos (SFCSHP, rojo) y boyas (SFCEBUY rojo); segundo panel: sensor AIRS (AIRSRT, rosa) y estaciones automáticas en aeropuertos (AWOS; naranja); tercer panel: sensor ASCAT (ASCATW, naranja) y radares de banda C (RADARC, azul); y cuarto panel: satélite GOES-16 (G16DMW; verde) y aviones (AIRCFT, rojo).

2.2. Sistema de pronóstico numérico

El sistema de pronóstico numérico del SAP.SMN produce pronósticos probabilísticos empleando un ensamble de 20 miembros y generando salidas horarias por un plazo de 48 horas, para 4 inicializaciones diarias (Matsudo y otros, 2022). Durante esta nota técnica denominamos a dicho pronóstico como “ENS”, el cual corresponde al pronóstico operativo del SMN durante el periodo de estudio que se extendió desde el 22 de agosto al 9 de diciembre 2023 (110 días). Asimismo, durante dicho periodo se ejecutaron experimentalmente en forma diaria 18 ciclos horarios de asimilación de datos desde las 18 UTC hasta las 12 UTC del día siguiente y un pronóstico por ensambles de 20 miembros a 24 horas inicializado a las 12 UTC a partir del ensamble de análisis regionales (al que denominaremos “ENS-DA”). Cabe destacar que ENS-DA es un pronóstico inicializado “en caliente” mientras que ENS es inicializado “en frío” por lo que, en variables como precipitación, el periodo de spin-up de ENS-DA es menor. Esto puede verse reflejado, por ejemplo, en el campo de precipitación en las primeras horas de pronóstico. La configuración del modelo que se utilizó en ENS y ENS-DA es la descrita en la sección 2, y sólo se diferencian entre sí por las condiciones iniciales y de borde (Tabla I).

Tabla I: Condiciones iniciales y de borde empleadas en los pronósticos operativos ENS y experimentales ENS-DA.

Sistema de Pronóstico	Condiciones iniciales	Condiciones de borde
ENS (OPERATIVO)	Análisis de GFS-GEFS	Pronósticos de GFS-GEFS del ciclo correspondiente (12 UTC)
ENS-DA (EXPERIMENTAL)	Análisis regionales con el sistema WRF-LETKF	Pronósticos de GFS-GEFS del ciclo previo (06 UTC)

2.3. Metodología de verificación

En el periodo de estudio se obtuvo un 62.7% de ejecuciones exitosas del pronóstico ENS-DA (69 pronósticos). El total de fallas (37.3%) se debió a la ejecución de tareas operativas con mayor prioridad en el sistema HPC operativo del SMN o a problemas en los tiempos de descarga de los datos de GFS-GEFS. Además, considerando algunas fallas en la ejecución de ENS durante ese período, la cantidad de pronósticos empleada para la comparación entre ENS y ENS-DA es de 65.

La verificación de los pronósticos de precipitación para ENS y ENS-DA se realizó utilizando el producto de estimación satelital SQPE-OBS (SQPE de ahora en adelante) desarrollado en el SMN que combina estimaciones satelitales de precipitación con observaciones puntuales de estaciones de superficie, para generar un producto de mayor calidad (Hobouchian y otros, 2021). Esta información se encuentra disponible para la región comprendida entre -56° y -20° de latitud y -76° y -49° de longitud con una resolución de 0.1° y se disponen datos desde el 1 de enero de 2018 hasta la actualidad. Los datos corresponden a valores de precipitación acumulados en un día pluviométrico, es decir en un periodo de 24 horas entre las 12Z del día correspondiente y las 12Z del día siguiente. Para este trabajo, se aplicó una máscara para realizar la verificación solo en territorio argentino dado que la corrección que se realiza en el SQPE considera más cantidad de información sobre nuestro país (Hobouchian y otros, 2021).

A su vez, se realizó también una verificación de variables de superficie a partir de observaciones de temperatura a 2 metros y magnitud de viento a 10 metros provenientes de la red de estaciones convencionales del SMN (ver listado de estaciones en Anexo II de Matsudo y otros (2023)). Cabe destacar que, si bien el pronóstico ENS cuenta con un proceso de calibración de las variables precipitación acumulada en 24 horas, temperatura a 2 metros y viento a 10 metros (Righetti y otros, 2024), en este trabajo se utilizarán las variables sin calibrar dado que no se aplicó un método de calibración al pronóstico ENS-DA. Una descripción de las medidas de verificación utilizadas se puede encontrar en el Anexo I.

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la verificación de los pronósticos ENS y ENS-DA de precipitación acumulada en 24 horas a partir de la estimación satelital SQPE, y de temperatura a 2 metros y magnitud de viento a 10 metros a partir de las observaciones de superficie del SMN.

3.1 Precipitación vs. SQPE

La Figura 3 muestra el campo de precipitación total acumulada en el periodo de verificación para la estimación SQPE y la media del ensamble de pronóstico ENS y ENS-DA. Se puede ver que ambos pronósticos

subestiman el máximo de precipitación observado en las provincias de Corrientes y Misiones. Sin embargo, puede verse un impacto positivo de utilizar asimilación de datos regionales para generar la condición inicial, al mejorar la representación espacial de dicho máximo en ENS-DA respecto a ENS.

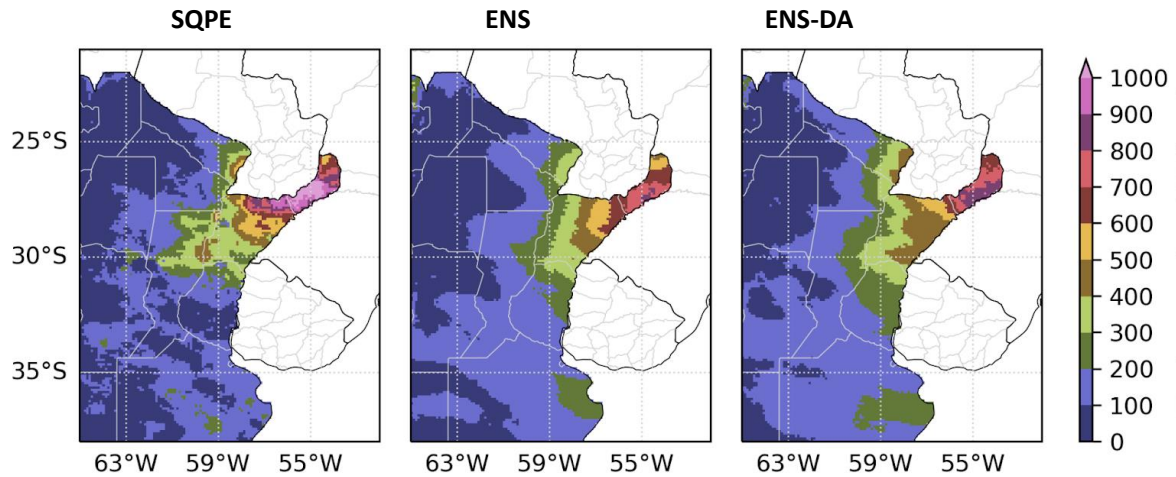


Figura 3: Precipitación total acumulada [mm] en el periodo de verificación, estimada por SQPE (izquierda) y pronosticada por la media del ensamble ENS (centro) y ENS-DA (derecha).

Con el objetivo de explorar las diferencias punto a punto entre los valores pronosticados y observados, se interpoló linealmente la retícula del modelo a la retícula regular de SQPE y se calcularon los campos medios de error cuadrático medio (RMSE) de la media del ensamble y de dispersión del ensamble siguiendo a Fortin y otros (2014), considerando el periodo de verificación. Para cada punto del dominio, se calculó el RMSE y SPREAD promediándolos sobre el periodo de verificación. La Figura 4 muestra el boxplot de la distribución de RMSE de los puntos del dominio y el valor medio del campo de SPREAD para ambos sistemas, mientras que la Figura 5 muestra los campos medios de RMSE para ambos sistemas y la diferencia entre los mismos.

En la Fig. 4 se observa que los boxplots son similares entre los sistemas, presentando ENS-DA una distribución con mayor rango que ENS. mientras que el valor medio de SPREAD se encuentra muy cerca del valor medio de RMSE en ambos pronósticos, siendo la diferencia levemente mayor en el pronóstico ENS-DA que en ENS.

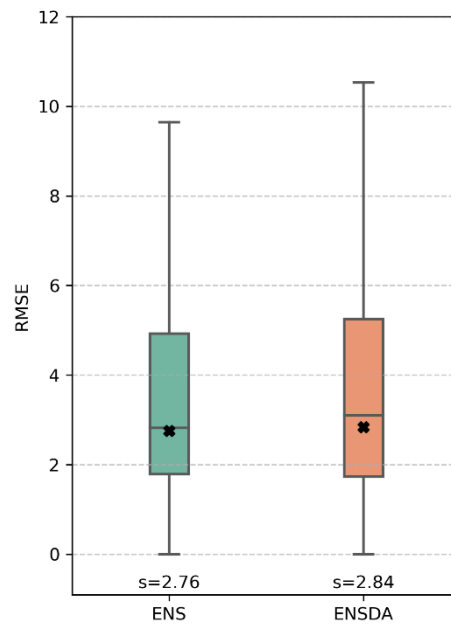


Figura 4: Boxplot del campo medio de RMSE de la media del ensamble para el pronóstico ENS (verde) y ENS-DA (naranja) y valor medio del campo medio de SPREAD (cruz), para la precipitación acumulada a 24 horas (mm/día). Los campos medios se obtienen considerando el periodo de verificación.

En la Fig. 5, se puede ver que los mayores valores de error se encuentran en la zona de máxima precipitación observada (c.f., Fig. 3) en ambos sistemas. Asimismo, las mayores diferencias entre sistemas se encuentran restringidas a la zona centro-norte de Argentina lo que podría responder a la distribución espacial y cantidad de observaciones asimiladas en ENS-DA. En particular, el pronóstico ENS-DA muestra mayores errores que ENS (colores verdes en Fig. 5) en algunas zonas del centro de la provincia de Buenos Aires, sur de Entre Ríos y al este de Salta, mientras que reduce el error respecto a ENS (colores violetas en Fig. 5) en las cercanías a la ciudad de Buenos Aires, algunas zonas del litoral y del norte del país.

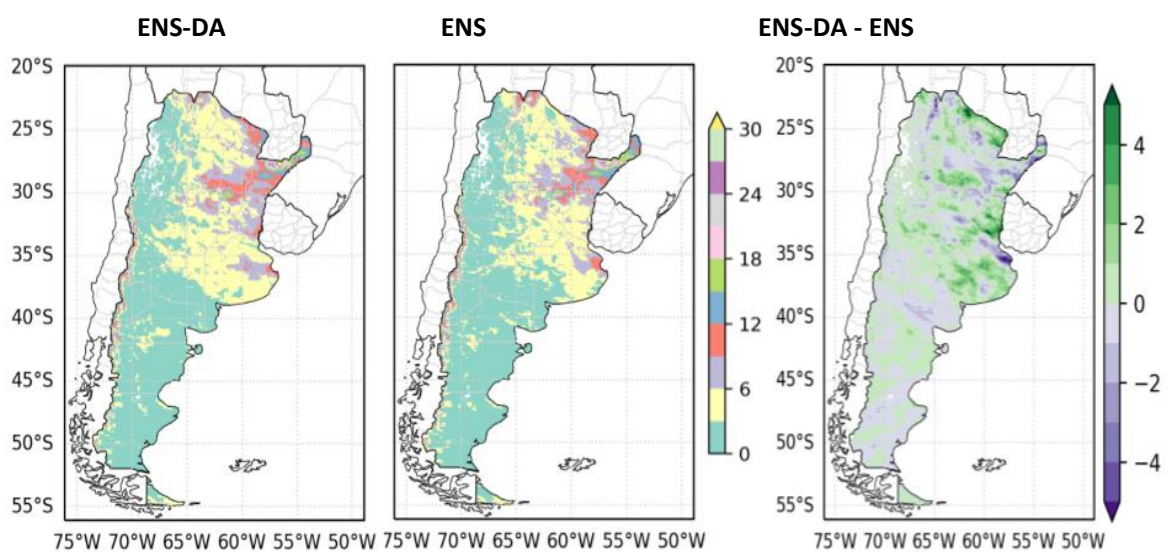


Figura 5: Campo medio de RMSE de la media del ensamble de precipitación acumulada en 24 horas (mm/día) en el periodo para el pronóstico ENS-DA (izquierda), el pronóstico ENS (medio), y la diferencia entre ENS-DA y ENS (derecha).

En la Figura 6 se muestran las funciones de distribución de probabilidad volumétrica de precipitación (PDF) de cada uno de los miembros de los sistemas ENS y ENS-DA, y la correspondiente a la estimación SQPE. Las curvas indican el porcentaje de precipitación total explicado en cada intervalo de lluvia (volumen relativo de precipitación), mientras que las barras grises muestran la distribución de precipitación observada. En el pronóstico ENS-DA, las distribuciones de precipitación de los miembros presentan mejor correspondencia con la distribución observada, mientras que las curvas de precipitación volumétrica del pronóstico ENS se encuentran desplazadas hacia las tasas de precipitación más bajas. Asimismo, el valor máximo de precipitación observado logra ser capturado por varios miembros del pronóstico ENS-DA y por ninguno de ENS, indicando el impacto positivo de utilizar análisis regionales como condición inicial y destacando la potencial utilidad en el pronóstico de eventos extremos.

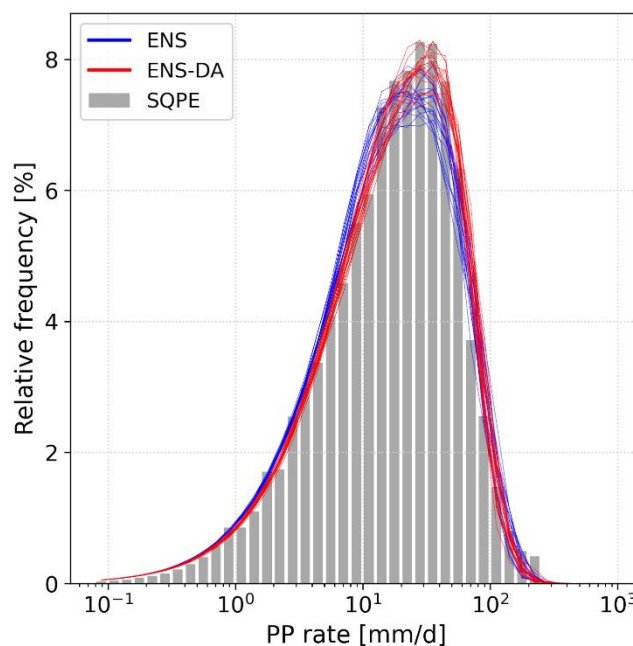


Figura 6: PDF volumétrica de los miembros del ensamble de precipitación acumulada en 24 horas (mm/día) para el pronóstico ENS (líneas azules) y ENS-DA (líneas rojas), y la distribución del volumen de precipitación de las observaciones SQPE (barras grises).

Finalmente, la confiabilidad de los pronósticos se analizó a partir de diagramas de confiabilidad para umbrales de precipitación acumulada en 24 horas de 1, 10 y 25 mm/día (Figura 7). Se puede ver que la confiabilidad de los pronósticos ENS y ENS-DA es similar, evidenciando que para probabilidades mayor al 20%, ambos pronósticos subestiman la probabilidad de los eventos asociados a los tres umbrales (i.e., las curvas están por debajo de la línea diagonal).

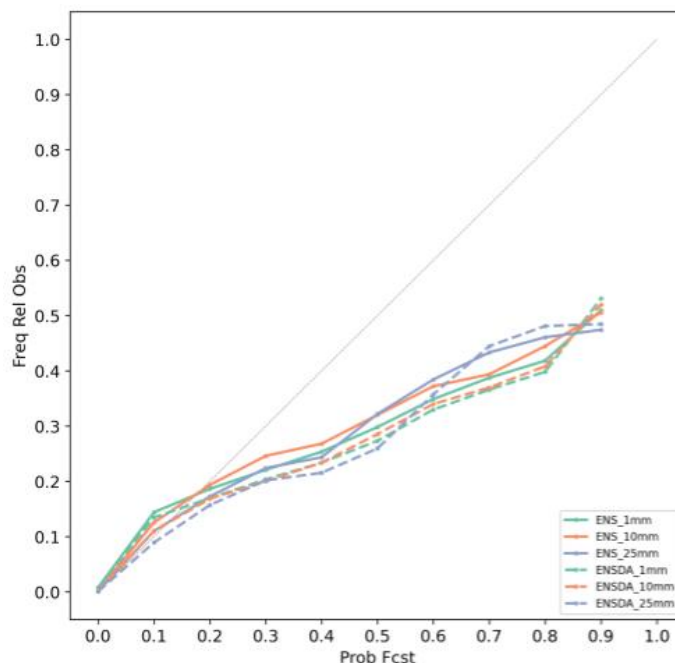


Figura 7: Diagrama de confiabilidad para los umbrales de 1 (verde), 10 (naranja) y 25 (violeta) mm/día, para el pronóstico ENS (línea llena) y ENS-DA (línea punteada).

3.2 Variables de superficie vs. estaciones convencionales del SMN

En esta sección se presentan los errores de ambos ensambles frente a observaciones provenientes de las estaciones convencionales de superficie del SMN. Para ello, para los pronósticos de cada ensamble, se calculó el RMSE para cada estación promediándolo en el periodo de verificación y luego se obtuvo un promedio para cada provincia (ver abreviaturas de nombres y ubicación en Anexo II). Luego, se calculó la diferencia entre ambos ensambles. La Figura 8 muestra la diferencia media de RMSE entre ENS y ENS-DA en función del plazo de pronóstico en cada una de las provincias de Argentina. Los valores positivos indican una mejora del ENS-DA respecto del ENS mientras que los valores negativos indican una degradación de la calidad del pronóstico.

Se puede ver que el impacto del ENS-DA en reducir el error en el pronóstico respecto a ENS es más evidente (valores verdes) para la magnitud de viento a 10 metros que para la temperatura a 2 metros. En general, las diferencias más grandes entre los errores de los distintos sistemas se dan en las primeras horas de pronóstico (con excepción de algunas provincias). En particular, para la temperatura a 2 metros, se puede ver que hay una degradación luego de la primera hora de pronóstico para provincias del centro y centro-norte, por ejemplo, CB, SF, ER (colores marrones). Esto puede responder a que los errores sistemáticos del ENS-DA no logran ser reducidos con la incorporación de las observaciones. Por otra parte, se observa que en las estaciones ubicadas más al sur del dominio el impacto positivo de inicializar el ensamble con análisis regionales persiste durante casi todas las horas de pronóstico (ej. NQ, SC, TF). Estos resultados sugieren que dada que, la cantidad de observaciones de temperatura provenientes de estaciones automáticas es mayor que la de viento (no se muestra), resultaría necesario profundizar en el estudio de los errores de representatividad de esta fuente de observación y su impacto en los análisis y pronósticos.

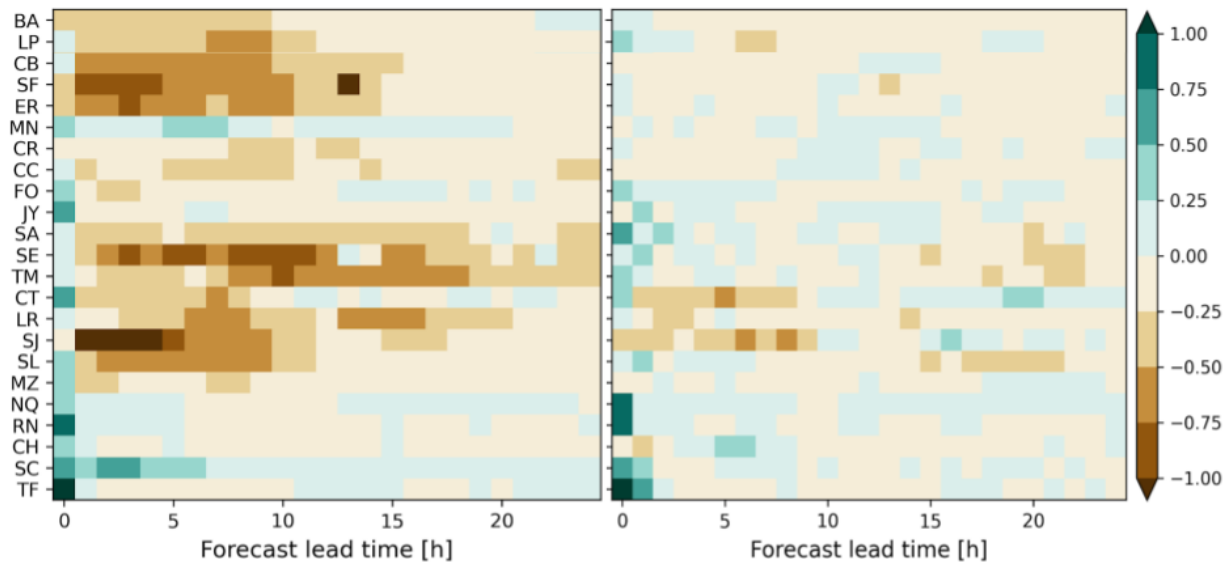


Figura 8: Diferencia de RMSE de la media del ensamble entre ENS y ENS-DA en función del plazo de pronóstico en cada provincia de Argentina, para temperatura a 2 metros (izquierda) y magnitud de viento a 10 metros (derecha). La lista detallada de abreviaciones se muestra en el Anexo II.

Las Figuras 9 y 10 muestran los boxplots del campo medio de RMSE de la media del ensamble y el valor medio del campo medio de SPREAD en función del plazo de pronóstico, para la temperatura a 2 metros y la magnitud de viento a 10 metros, respectivamente. Los campos medios de RMSE y SPREAD se obtuvieron en 101 puntos de estación, considerando el periodo de verificación.

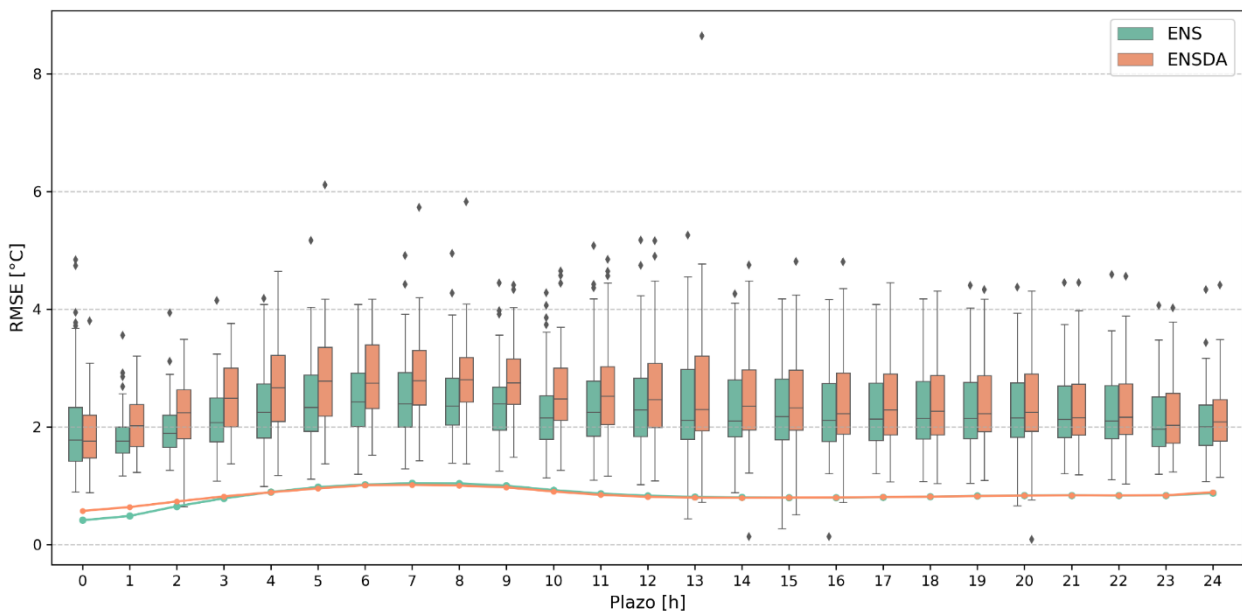


Figura 9: Boxplot del campo medio de RMSE de la media del ensamble y valor medio del campo medio de SPREAD (línea llena) de temperatura a 2 metros en función del plazo de pronóstico, para el pronóstico ENS (verde) y ENS-DA (naranja). Los campos medios se obtienen en 101 puntos de estación, considerando el periodo de verificación. Los puntos fuera del boxplot indican *outliers*.

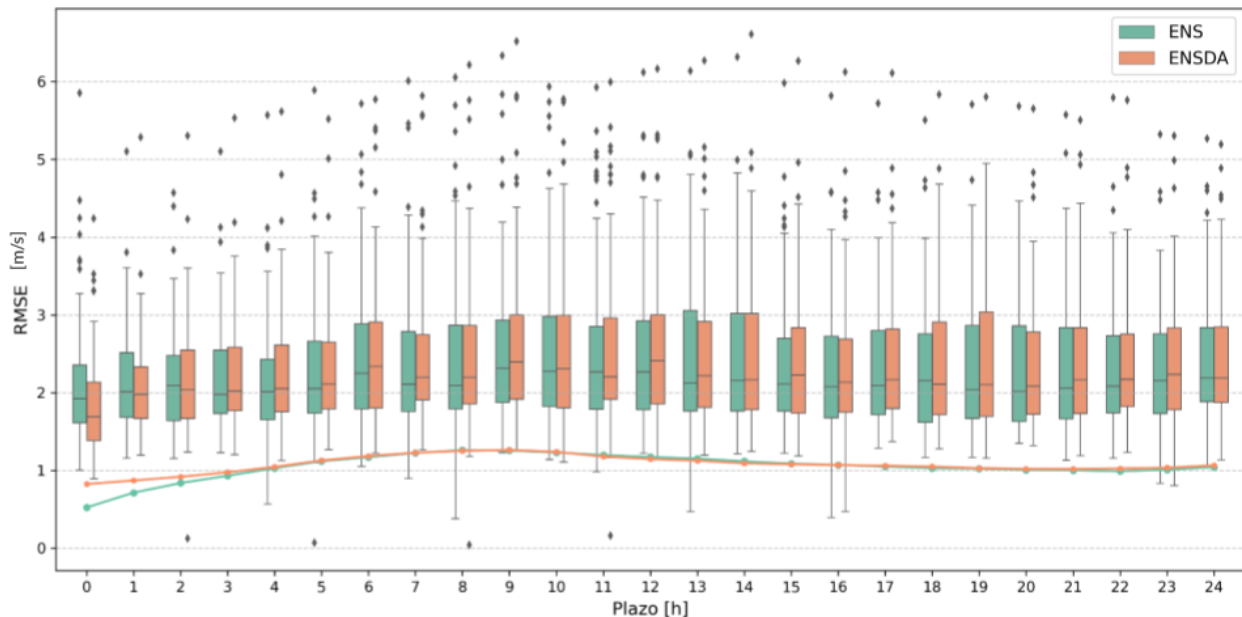


Figura 10: Como en la Fig. 9, pero para magnitud de viento a 10 metros.

En ambas variables se observa que el SPREAD es mayor en el pronóstico ENS-DA que en ENS únicamente durante las primeras 2 horas, mostrando luego un comportamiento similar. Asimismo, se observa un menor RMSE en el pronóstico ENS-DA respecto a ENS para el inicio del pronóstico (plazo 0), con una reducción más acentuada en viento que en temperatura (en consonancia con los resultados de la Fig. 8). Sin embargo, para plazos de pronóstico más largos, el error es menor en ENS, y en particular, en el caso de la temperatura, el error disminuye levemente en dichos plazos.

4. CONCLUSIONES

Con el fin de agregar valor a los pronósticos regionales del SMN, el sistema de asimilación de datos WRF-LETKF, que permite la inclusión de información de diferentes fuentes observacionales, entre ellas datos locales como son los de la red nacional de radares meteorológicos, fue evaluado en un periodo de estudio de 65 días entre agosto y diciembre de 2023. Para ello, se comparó el desempeño de los pronósticos probabilísticos inicializados a partir de un modelo global (ENS; implementación operativa hasta principios de diciembre de 2024) y los inicializados a partir de análisis regionales (ENS-DA). En ambos casos, el sistema de pronóstico empleó un ensamble de 20 miembros y se evaluaron pronósticos inicializados a las 12 UTC para las variables precipitación acumulada en 24 horas, temperatura a 2 metros y magnitud de viento a 10 metros.

El impacto de utilizar análisis regionales para inicializar pronósticos probabilísticos resultó variable, dependiendo de la región del dominio, la variable pronosticada y el plazo de pronóstico. En líneas generales, el desempeño del sistema ENS-DA resultó similar y en ocasiones mejor al desempeño del sistema ENS. Dado que no se encontró un deterioro sustancial en el pronóstico ENS-DA respecto a ENS, considerando resultados previos en la región para casos de estudio en los que se vio que asimilar datos tuvo un impacto positivo en los pronósticos y teniendo en cuenta la experiencia de otros centros meteorológicos y de la comunidad científica a nivel mundial, se llevó adelante el pase a operaciones del sistema de asimilación de datos WRF-LETKF descripto en la Sección 2.1. Desde el 16 de diciembre de 2024, el pronóstico probabilístico operativo

del SAP.SMN cuenta con una inicialización en caliente a partir de los análisis regionales obtenidos mediante el sistema acoplado LETKF-WRF.

A futuro, se busca realizar el pase a operaciones para que el pronóstico determinístico del SAP.SMN cuente también con una inicialización en caliente a partir del sistema WRF-LETKF. Asimismo, se espera poder abordar diversos desafíos con el fin último de continuar mejorando la calidad del pronóstico numérico del SMN. Uno de ellos consiste en analizar el impacto individual de cada observación asimilada para poder explotar de la mejor forma posible los datos disponibles en el país. Por ejemplo, estudiar la asimilación de datos de radar Doppler podría mejorar la inicialización “en caliente”. Por otro lado, se considerará la implementación de un esquema de verificación más robusto, incluyendo una mayor cantidad de variables, otras horas de inicialización, y un periodo más extenso.

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>

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 ensemble

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

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

Spread medio del ensemble

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

donde M es la cantidad de miembros del ensemble, P_i representa la media del ensemble, $P_{k,i}$ 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 ensemble (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 ensemble. 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 ensemble 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 ensemble, se computa utilizando la media del ensemble 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

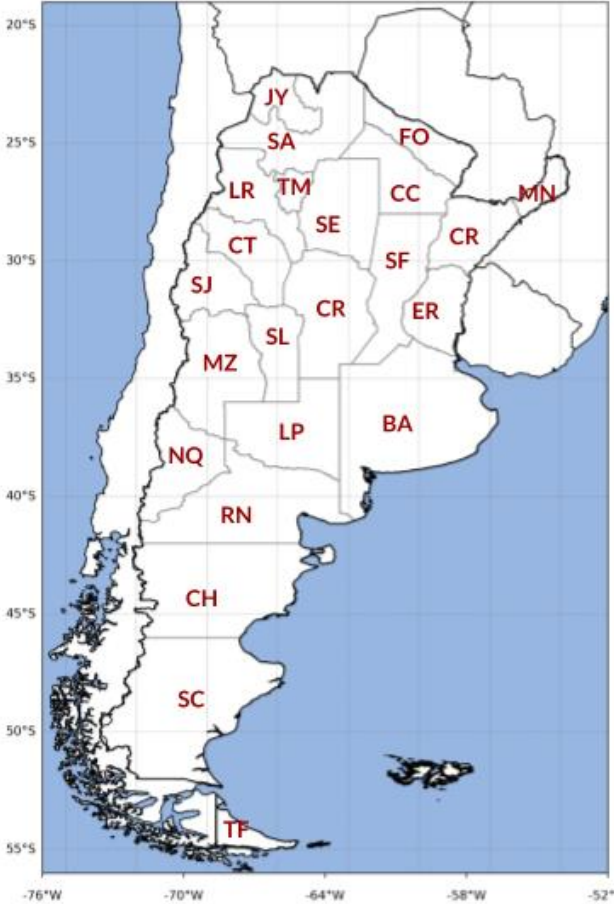
El diagrama de confiabilidad muestra las probabilidades pronosticadas en función de las frecuencias observadas donde el rango de los valores de los pronósticos se divide en B intervalos de probabilidad (por ejemplo, 0-5%, 5-15%, 15-25%, etc.). Mide la correspondencia entre las probabilidades pronosticadas 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), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martín Rugna (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).