

Evaluación de pronósticos meteorológicos semanales y su aplicación al sector de emergencias

Alejandro Godoy¹, Laura Aldeco¹, Cynthia Matsudo¹, Federico Cutraro¹, Carolina Cerrudo¹, Esteban Zuccaro¹, Cam Córdoba¹, Julian Goni¹, Nayla Garcilazo¹, Lorena Ferreira¹, Daniela D'Amen¹

¹ Servicio Meteorológico Nacional. Av. Dorrego 4019, CABA, Argentina
agodoy@smn.gob.ar

Abstract. El trabajo tiene como objetivo presentar la herramienta de perspectiva semanal desarrollada por los pronosticadores del SMN y evaluada en conjunto con usuarios de gestión de riesgo. Además, se evalúa la habilidad de los pronósticos calibrados en la escala semanal desarrollados en el SMN, con el fin de proveer a tomadores de decisión un pronóstico meteorológico con 2 semanas de anticipación. La calibración de los pronósticos basados en el modelo GEFS muestra mejoras significativas en los pronósticos semanales de la precipitación acumulada semanal. Asimismo, se muestra el uso que se le da a las distintas herramientas de pronóstico para el desarrollo de una perspectiva a 2 semanas que se realiza de forma operativa. Dicho servicio se envía periódicamente a usuarios del sector de gestión del riesgo de desastres, se evalúa su experiencia al utilizar el producto y se identifican oportunidades de mejora del producto. La verificación de las áreas pronosticadas muestra un alto grado de acierto.

Palabras clave: Perspectiva semanal, calibración, tomadores de decisión.

1 Introducción

Las predicciones climáticas subestacionales, en particular los pronósticos en periodos de semanas son relevantes para la toma de decisiones en diferentes sectores como por ejemplo el sector de gestión del riesgo. Los tomadores de decisión necesitan de herramientas de calidad para anticiparse a posibles escenarios adversos debidos al desarrollo de fenómenos meteorológicos extremos. Un pronóstico con varias semanas de antelación es una herramienta que ayuda a la gestión y planificación de acciones anticipatorias.

Los modelos de pronóstico numérico pierden gran parte de su capacidad de predicción en un plazo mayor a 10 días [10]. Sin embargo, existen ventanas de oportunidad, debido a la existencia de forzantes atmosféricos en esta escala, que permiten aumentar la predictibilidad de los pronósticos a 2 y 3 semanas de plazo [9]. En este sentido, es fundamental conocer la habilidad de los modelos numéricos en predecir variables atmosféricas en la escala semanal y si es posible reducir el error en los pronósticos.

El error sistemático que pueden tener los modelos numéricos se puede reducir a través de técnicas de calibración. Fan y van den Dool [5] aplicaron una calibración básica a la variable precipitación y temperatura semanal y encuentran una mejora en el pronóstico a 1 y 2 semanas. En nuestro país, por ejemplo, se han aplicado técnicas de calibración a los pronósticos del ensamble del modelo Global Forecasting System (GFS) para la variable temperatura media semanal obteniendo resultados satisfactorios [6]. Con respecto a los pronósticos de precipitación acumulada semanal, calibrados por la técnica de análogos [3], muestran un mejor desempeño durante la semana 1, y considerando un umbral de 30 mm el pronóstico tiende a pronosticar menos eventos que los observados y con el umbral de 5 mm se encuentra lo opuesto. Como fue notado en [4] los pronósticos en esta escala para el modelo GFS presentan un bias positivo, el cual genera un aumento de las falsas alarmas y por lo tanto una disminución de la calidad de los mismos.

Los organismos de gestión del riesgo de desastres tienen la responsabilidad de monitorear y responder ante las diversas amenazas de origen natural que implican riesgos para la población, los bienes y el ambiente. Por este motivo la información oficial generada por organismos científico-técnicos resulta un elemento central para la toma de decisiones y la planificación de acciones en distintos plazos de anticipación por parte de las instituciones estatales que trabajan en los distintos niveles jurisdiccionales. Dentro de este sector de usuarios, que de acuerdo al diseño organizacional de cada provincia y/o municipio recibe distintas denominaciones como Protección civil, Defensa civil o Gestión del riesgo, el acceso a información meteorológica y climática en forma oportuna resulta indispensable para poder anticipar y reducir el impacto negativo que pueden generar las amenazas de origen natural. La adopción de forma creciente del enfoque de gestión integral del riesgo de desastres requiere un mayor conocimiento de las amenazas que permita desplegar recursos en acciones, no sólo de respuesta, sino también de planificación, prevención, preparación y mitigación del riesgo. En este contexto, los servicios meteorológicos nacionales tienen la posibilidad de brindar información científico-técnica oportuna y útil para usuarios específicos por medio de un mejor conocimiento y predicción de la amenaza. En particular, resulta útil la provisión de información en todos los plazos de pronósticos que resultan efectivos para la toma de decisiones anticipadas por parte de sus usuarios, tal es el caso de esta perspectiva semanal a dos semanas.

El objetivo del presente trabajo es conocer la habilidad de los pronósticos calibrados, desarrollados en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en el plazo de pronóstico de 2 semanas. Por otro lado, presentar la herramienta de perspectiva a 2 semanas para usuarios de gestión de riesgo desarrollada por los pronosticadores del SMN y los resultados de la evaluación e identificación de oportunidades de mejora realizadas junto a técnicos que integran el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR).

2 Datos y Metodología

Los pronósticos numéricos semanales utilizados para el desarrollo de la perspectiva a 2 semanas, provienen de diferentes centros mundiales de pronóstico. Los mismos poseen un error sistemático que se puede reducir a través de técnicas de calibración. Los pronósticos semanales calibrados desarrollados en el SMN utilizan las salidas del ciclo 00 UTC del Global Ensemble Forecast System (GEFS) de la NOAA. A continuación, se detallan las técnicas de calibración, las variables utilizadas y la metodología para el desarrollo de la perspectiva semanal. Finalmente se detallan las métricas utilizadas para la evaluación y verificación de los pronósticos semanales de precipitación.

2.1 Metodologías de calibración de temperatura y precipitación semanal

La primera metodología empleada para calibrar los pronósticos utilizados para el desarrollo de la perspectiva semanal es la técnica de análogos. En esta metodología se utilizan datos del modelo GEFS y datos en puntos de estación de la red del SMN en el período 2000-2019. La técnica se puede resumir de la siguiente manera: para cada semana de pronóstico se buscan campos análogos en el historial de pronósticos pasados del GEFS. Estos campos análogos se buscan utilizando el Error Cuadrático Medio (ECM) como medida de similitud. Una vez hallados los campos análogos, la técnica utiliza los datos observados en las estaciones en las fechas de los campos análogos para conformar un ensamble. De esta manera se construye un pronóstico por ensamble calibrado por observaciones. Más detalles respecto de la aplicación de la técnica de análogos se pueden encontrar en [1] y [2]. Para el caso de la precipitación la búsqueda de análogos se realizó en un entorno de cada una de las estaciones meteorológicas involucradas, mientras que en el caso de temperatura media los análogos se buscan en el punto de retícula del modelo más cercano a la estación, como se propone en [7]. Para calcular las anomalías semanales se utilizan los datos observados en el período 2000-2019.

Por otro lado, la segunda técnica de calibración es la metodología de Regresión Adaptada basada en el Filtro de Kalman (RAFK) [6]. La misma es empleada en el pronóstico de la temperatura media semanal y consiste en una regresión lineal múltiple en donde los predictores son variables pronosticadas por el modelo numérico a calibrar y el predictando es la corrección que se debe realizar al pronóstico. A partir de comparar los pronósticos que se realizan día a día con las observaciones, mediante el uso del Filtro de Kalman, los coeficientes de la regresión lineal se ajustan de manera óptima para que la relación hallada entre el predictando y los predictores sea correcta.

Por último, para el pronóstico de la precipitación semanal se aplicó la metodología de Empirical Quantile Mapping (EQM), la cual se basa en encontrar una función de transferencia tal que al ser aplicada al pronóstico de precipitación su nueva distribución sea igual a la distribución de la precipitación observada. En este caso, se consideró la base de datos de estimaciones satelitales SQPE [8]. Esta metodología fue empleada con éxito a nivel diario por [10].

2.2 Metodología para el desarrollo de la perspectiva a 2 semanas

El pronóstico de perspectiva a 2 semanas para el sector de emergencias se realiza una vez por semana y se basa en los pronósticos de anomalía de temperatura media semanal y precipitación acumulada media semanal con un anticipo de dos semanas y en todo el territorio nacional. En estos pronósticos se marcan áreas que representan las zonas con anomalías positivas o negativas (temperatura media) y déficit o superávit (precipitación acumulada). En la Fig. 1 se muestra un ejemplo del producto enviado a los usuarios. Durante el proceso de desarrollo de la perspectiva, se generan reuniones con especialistas del SMN para discutir/analizar los resultados de todas las herramientas. El producto final es un consolidado del análisis cuyo producto final se genera en formato georeferenciados con QGIS, disponible para ser consumidos por los usuarios. A futuro, este producto podría ser ingestado en una IDE.

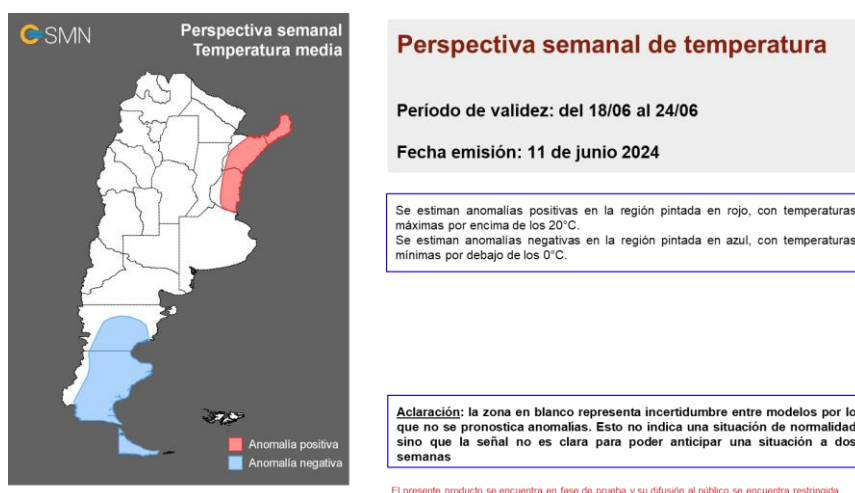


Fig. 1. Ejemplo de la perspectiva a dos semanas donde se identifican las anomalías negativas (bajas temperaturas) y positivas (altas temperaturas) respecto a la climatología semanal. La misma es enviada a usuarios del sector de gestión del riesgo.

Para definir las áreas marcadas se utilizan los pronósticos semanales de diferentes modelos numéricos y también los pronósticos diarios a dos semanas. En el caso de datos o campos diarios se utilizan pronósticos de precipitación y temperatura del ECMWF y del GFS. Además, se analizan los campos de circulación atmosférica diaria y semanal. Los productos de pronósticos de los modelos numéricos en la escala semanal que se utilizan son el modelo GFS, GEFS, CFS, ECMWF, NAEFS, JMA y los pronósticos calibrados generados con la técnica de Análogos, RAFK y EQM (SMN). Para marcar las áreas de anomalía de temperatura media se establece un umbral de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para determinar zonas con valores positivos y negativos. Asimismo, para marcar las áreas de anomalía de precipitación acumulada se establece un umbral de $\pm 10\text{ mm}$ para determinar zonas con déficit o superávit. Para ambas variables, se analizan todos los

modelos numéricos, aunque se pondera el modelo de análogos ya que este último basa su pronóstico en observaciones de estaciones meteorológicas. Para ambas variables se analizan los campos de circulación atmosféricos para establecer patrones que coincidan con lo observado en los modelos.

2.3 Métricas de verificación

En este trabajo se muestran los resultados de la verificación de los pronósticos calibrados de precipitación acumulada semanal. Para ello se utilizan como observaciones los mismos datos que se utilizaron para la calibración. Se utilizan los siguientes estadísticos categóricos utilizados comúnmente en la literatura: Bias en Frecuencia (BIAS), Probability of Detection (POD) y Equitable Threat Score (ETS). El valor óptimo de cada índice es 1, lo que indicaría un pronóstico perfecto. Estas métricas en conjunto nos dan una idea del desempeño de los pronósticos en relación con aciertos y falsas alarmas, determinadas a partir de analizar distintos umbrales de precipitación. En este trabajo, se definió el valor de 5 mm para discriminar los casos de lluvia y no lluvia y el valor de 30 mm para evaluar el desempeño de los pronósticos con un umbral más alto de precipitación. Para contemplar el ciclo anual de la precipitación se calcularon dichos estadísticos de manera trimestral desde marzo 2021 hasta noviembre de 2023 inclusive.

La verificación de la perspectiva a dos semanas se realiza analizando, en las áreas pronosticadas, los datos de las observaciones de todas las estaciones del SMN. La base de datos observada se confeccionó con la información diaria de 110 estaciones (periodo 1981-2010) para realizar promedios semanales de temperatura media y precipitación y obtener la climatología semanal de ambas variables. En primer lugar, se obtiene el valor climatológico diario de cada estación, para temperatura y precipitación, y luego se aplica un promedio (acumulado) móvil de 7 días para obtener la climatología semanal de la temperatura (precipitación).

Si las anomalías cumplen los umbrales establecidos anteriormente se consideran aciertos, falsas alarmas si no cumplen y sorpresas si se dan anomalías de signo contrario al pronosticado. Luego, a través de tablas de contingencia, se calculan los siguientes índices: BIAS en frecuencia, FAR (False Alarm Rate), POD (Probability of Detection) y TS (Threat Score). Un pronóstico idealmente bueno será uno con BIAS cercano a 1, FAR cercano a 0, POD cercano a 1 y TS cercano también a 1.

A continuación, se muestran las ecuaciones de las métricas utilizadas tanto para los pronósticos calibrados como para la perspectiva semanal.

$$BIAS = \frac{aciertos + falsas\ alarmas}{aciertos + sorpresas} \quad (1)$$

$$POD = \frac{aciertos}{aciertos + sorpresas} \quad (2)$$

$$ETS = \frac{aciertos - aciertos_{aleat}}{(aciertos + sorpresas + falsas\ alarmas - aciertos_{aleat})} \quad (3)$$

Donde,

$$aciertos_{aleat} = \frac{(aciertos+sorpresas).(aciertos+falsas alarmas)}{total} \quad (4)$$

$$TS = \frac{aciertos}{aciertos+sorpresas+falsas alarmas} \quad (5)$$

3 Resultados y discusión

3.1 Evaluación de los pronósticos calibrados semanales del SMN

A continuación, se muestran las series temporales de BIAS, POD y ETS para los pronósticos de precipitación sin calibrar y calibrados mediante la técnica EQM válidos para la semana 2 para los umbrales de 5 y 30 mm (Fig. 2).

Para el umbral de 5 mm, se puede ver que el pronóstico sin calibrar sobreestima la frecuencia de eventos, mientras que la calibración muestra una clara mejora al reducir esta sobreestimación. En cuanto a los valores de POD, si bien la calibración parecería estar reduciendo la capacidad de detección de los eventos, esto puede estar relacionado con la misma sobreestimación de los pronósticos sin calibrar que no es penalizado por este índice. En cambio, el ETS que incluye las falsas alarmas, indica una clara mejora con la calibración.

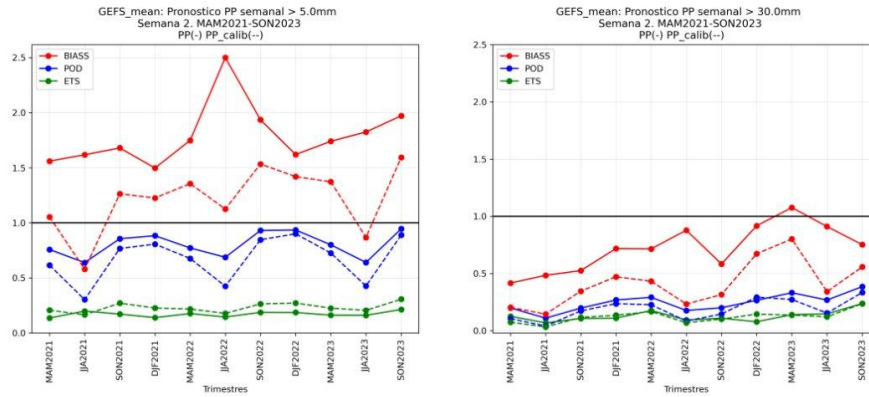


Fig. 2. Pronóstico de precipitación calibrado por técnica EQM para la semana 2 y umbrales de 5 mm y 30 mm.

Para el umbral de 30 mm, al ser un umbral más alto, la predictibilidad se ve reducida, lo cual se puede ver en la disminución del valor de ETS y POD. Asimismo, se ve una menor cantidad de casos en los cuales se pronostican precipitaciones por encima de este umbral y que la calibración no logra mejorar.

A continuación, se muestran las mismas series, pero para los pronósticos de precipitación calibrados mediante la técnica de análogos (Fig. 3). Se puede ver que las series temporales de los estadísticos muestran un comportamiento similar a la técnica de calibración de EQM para ambos umbrales. Las diferencias en magnitud pueden responder a las distintas bases de datos observados utilizadas para la verificación y a las metodologías empleadas.

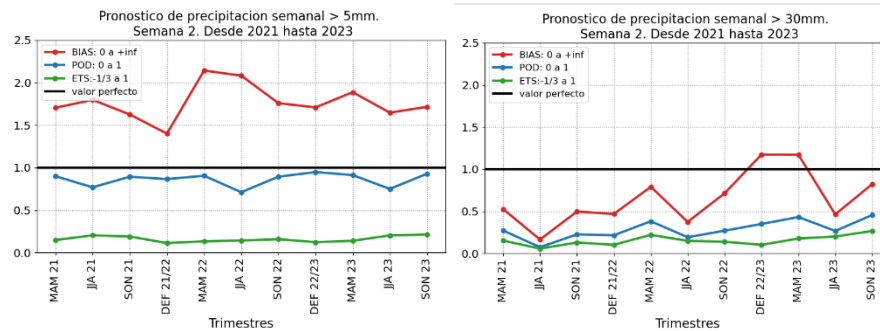


Fig. 3. Pronóstico de precipitación calibrado por técnica de análogos para la semana 2 y umbrales de 5 mm y 30 mm.

3.2 Verificación de la perspectiva a dos semanas

La verificación de la perspectiva se realiza en base a 85 pronósticos confeccionados por los pronosticadores en el periodo enero 2023 hasta agosto 2024. En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de un pronóstico de perspectiva a dos semanas, junto con las observaciones, donde se pronosticó muy bien el área de un evento de bajas temperaturas y un evento de déficit de precipitación en la región de cordillera de la Patagonia. Sin embargo, no fue capaz de ver las condiciones de déficit (este de Buenos Aires) y excesos de lluvias (Misiones), mostrando las limitaciones del producto en un pronóstico a mayor plazo.

En la tabla 1 se muestran los resultados de la verificación de los pronósticos de anomalía de temperatura media y precipitación acumulada semanal. Los resultados muestran que el POD es cercano a 1 para el pronóstico de temperatura media semanal, mientras que para la precipitación acumulada es levemente menor, aunque este último posee un menor FAR que para el pronóstico de temperatura. El TS indica la presencia de falsas alarmas y sorpresas que reducen la habilidad del pronóstico en estas escalas. El desafío es reducir las falsas alarmas y las sorpresas para obtener un producto de mejor calidad.

Tabla 1. Métricas de verificación de pronósticos de perspectiva semanal para la temperatura media y precipitación acumulada semanal.

Métricas	Temperatura media	Precipitación media
BIAS	1.60	1.08
POD	0.95	0.72
FAR	0.41	0.34
TS	0.57	0.52

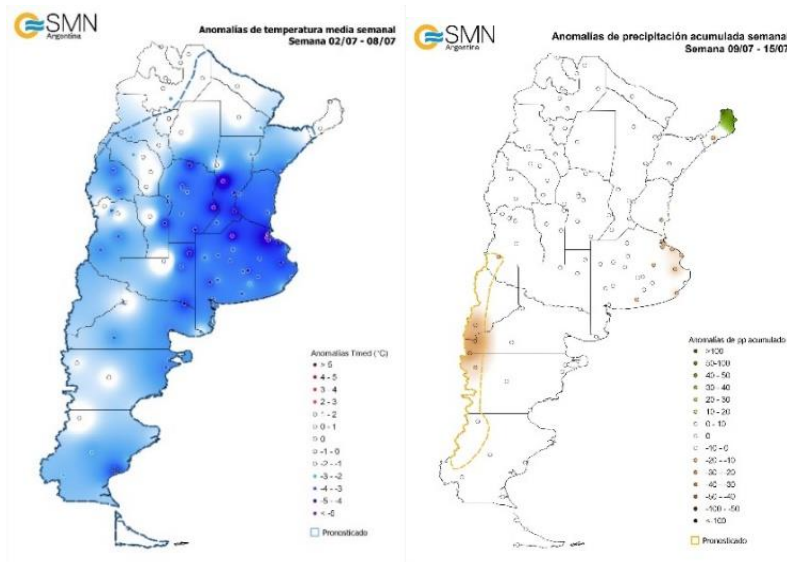


Fig. 4. Gráfico de pronóstico (contorno línea punteada) vs observado (sombreado) para la anomalía de temperatura media y precipitación acumulada semanal del periodo 02/07 al 08/07/2024 (temperatura media) y 09/07 al 15/07/2024 (precipitación acumulada)

3.3 Evaluación del producto con el usuario y oportunidades de mejora

Con el propósito de relevar información para la mejora del producto, se inició un proceso de prueba junto a usuarios de dos organismos públicos especializados: personal técnico de la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres de la Secretaría de Protección Civil del Ministerio de Seguridad y Justicia de la provincia de Río Negro y personal técnico de la Dirección de Análisis de Riesgo de la Subsecretaría de Gestión del Riesgo y Protección Civil del Ministerio de Seguridad de la Nación. Con cada grupo de usuarios el proceso consistió, en primer lugar, en realizar una reunión de presentación de las características del producto, y luego se procedió a enviar el producto todas las semanas por correo electrónico a los responsables designados por el lapso de tres meses.

Durante este período se enviaron dos encuestas y se realizó una entrevista de cierre en donde se consultó a los usuarios sobre su experiencia en relación a los siguientes aspectos: el nivel de satisfacción con la visualización del producto, la comprensión del texto, las preferencias sobre el canal de recepción del producto, los usos posibles de la información y las decisiones tomadas a partir de la misma, la pertinencia de los umbrales de anomalías empleados, el conocimiento de los datos climatológicos y la necesidad de información ampliatoria que podrían requerir los usuarios.

A través de estas instancias se relevó la información que se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Relevamiento de la información a usuarios

Aspectos relevados	Devolución de los usuarios
Valoración general del producto	Positiva. Se destaca lo sintético de la información y su utilidad para la planificación de acciones y la toma de decisiones. El producto fue incorporado al análisis del riesgo en forma complementaria a los pronósticos de menor escala ya provistos en forma operativa por el SMN.
Comprensión del contenido y escala espacial	Se destaca su fácil comprensión. La noción de anomalías no presentó dificultades para su interpretación en el perfil de usuarios consultados. La escala del producto resultó de gran interés para aquellos usuarios que realizan tareas de análisis del riesgo a escala nacional. Dependiendo del área de incumbencia del usuario podría ser de interés una visualización del producto a menor escala, como la provincial.
Oportunidades de mejora	Evaluar la posibilidad de incorporar avisos o alertas en la visualización del producto en caso de preverse la probabilidad de eventos extremos. Interés en acceder a información similar para otros fenómenos como vientos, nevadas o radiación UV. Mejorar la visualización en formato vertical para una mejor lectura en teléfonos móviles.

En una segunda etapa, se está realizando un nuevo proceso de evaluación del producto junto con usuarios del sector humanitario pertenecientes a Cruz Roja Argentina y se espera replicar el proceso junto a usuarios de la Administración de Parques Nacionales y/o de otros sectores productivos potencialmente interesados en pronósticos meteorológicos de esta escala.

Referencias

1. Aldeco, L.: Aplicación de la técnica de análogos a la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación sobre algunas estaciones de la Argentina. Tesis de Licenciatura del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, Universidad de Buenos Aires (2011)
2. Aldeco L. S., Ruiz J. J., Saulo C. A.: Generación y Evaluación de Pronósticos Probabilísticos de Precipitación en algunas Estaciones de Argentina, Congremet XI. Actas del Congreso Nacional de Meteorología (2012)
3. Aldeco, L. S., Ruiz, J. J., Saulo, A. C., de Elía, R.: Calibración de los pronósticos semanales de precipitación y temperatura media operativos en el Servicio Meteorológico Nacional. Congremet XIII. Actas del Congreso Nacional de Meteorología (2022)

4. Castro, L., Godoy, A.: Estudio del desempeño del modelo subestacional GFS para pronosticar precipitación a dos semanas. Nota Técnica SMN 2024-168 (2024)
5. Fan, Y., Van den Dool H.: Bias Correction and Forecast Skill of NCEP GFS Ensemble Week-1 and Week-2 Precipitation, 2-m Surface Air Temperature, and Soil Moisture Forecasts. *Wea. Forecasting*, 26, 355–370 (2011)
6. Godoy, A. A., Cutraro F.: Evaluación de pronósticos numéricos calibrados de la temperatura semanal. Nota Técnica SMN 2024-159 (2024)
7. Hamill, T., Whitaker J. S.: Ensemble Calibration of 500-hPa Geopotential Height and 850-hPa and 2-m Temperatures Using Reforecasts. *Monthly Weather Review*, 135, 3273-3280 (2007)
8. Hobouchian, M.P., Díaz, G., Vidal, L., García Skabar, Y., Ferreira, L., Maas, M., Rossi Lopardo, M.S., Veiga, H., Rugna, M.: Ajuste de la estimación de precipitación satelitalIMERG con observaciones pluviométricas en Argentina. Nota Técnica SMN 2021-105 (2021)
9. Mariotti, A., and Coauthors: Windows of Opportunity for Skillful Forecasts Subseasonal to Seasonal and Beyond. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 101, E608–E625, (2020)
10. Righetti, S., Cutraro F., García Skabar Y., Sacco M.: Calibración de los pronósticos de precipitación acumulada diaria. Nota Técnica SMN 2024-164 (2024)
11. White, C.J. and Coauthors: Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Met. Apps*, 24: 315-325 (2017)