

# EVALUACIÓN DE PRONÓSTICOS PROBABILÍSTICOS DE PRECIPITACIÓN EN EL NE DE ARGENTINA

**Laura S. Aldeco<sup>1</sup>, Juan Ruiz<sup>2</sup> y Celeste Saulo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Servicio Meteorológico Nacional. (aldeco@smn.gov.ar)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA). Dpto. de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires.

En el presente trabajo se realizó una evaluación del desempeño de la técnica de pronóstico por análogos para la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación a corto y mediano plazo. Dicha técnica consiste en utilizar una extensa base de datos de campos de precipitación pronosticados con un modelo numérico de la atmósfera y comparar el pronóstico de los próximos días con los casos archivados en dicha base de datos utilizando una medida para definir el grado de similitud de los mismos. Una vez encontrados los campos con mayor similitud (i.e: los análogos) se agrupan los datos observados en las fechas correspondientes a dichos campos, a partir de los cuales se pueden obtener pronósticos probabilísticos de precipitación. Esta técnica tiene la particularidad de trabajar en base a pronósticos numéricos y observaciones, y su objetivo es mejorar los pronósticos mediante una corrección estadística. La aplicación de esta metodología requiere de la disponibilidad de un amplio historial de pronósticos, tal que puedan encontrarse suficientes análogos. Por ello, en este estudio se utilizan los pronósticos retrospectivos (“reforecast”) del modelo MRF del NCEP entre los años 1979 y 2007, que son pronósticos realizados hasta un plazo de 14 días, recalculados utilizando la misma versión del modelo y que cuentan con una resolución horizontal de aproximadamente 2.5°. En este trabajo en particular se verificaron -por primera vez en nuestra región utilizando esta metodología- los pronósticos probabilísticos de precipitación a 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12 y 14 días para los trimestres de invierno y verano en el período 1979-2007. Los resultados muestran que la calidad de los pronósticos mejora a partir de la aplicación de la técnica, con lo cual se considera que es viable la generación de un sistema operativo de pronósticos probabilísticos por análogos para la región.

Palabras clave: precipitación, pronósticos retrospectivos, pronóstico probabilístico

## INTRODUCCIÓN

El pronóstico numérico trae asociada una determinada incertidumbre (Lorenz, 1963), la cual puede ser estimada a través de la utilización de pronósticos probabilísticos. Otro aspecto importante relacionado con el pronóstico numérico es que esta incertidumbre puede cambiar de un día a otro, y por ello es importante obtener información sobre la incertidumbre del pronóstico para cada día e particular. Uno de estos métodos podría ser el pronóstico por ensambles o por conjuntos. Una de las formas más comunes de obtenerlos es generando diferentes corridas de un mismo modelo numérico a partir de condiciones iniciales levemente diferentes. Existen diferentes formas de representar o visualizar las salidas del pronóstico por conjuntos. Se puede calcular el promedio o media del ensamble. También se pueden elaborar pronósticos probabilísticos y de esta manera se le asigna a un evento dado un valor de probabilidad, que es calculado en base a la información provista por el ensamble. En este trabajo por ejemplo estos eventos son representados por la ocurrencia de precipitación por encima de un determinado umbral a diferentes plazos de pronóstico. La probabilidad puede calcularse fácilmente, por ejemplo si el ensamble está formado por 15 miembros y 9 de ellos pronostican precipitación por encima de 5 mm, entonces la probabilidad de que haya precipitación superior a 5 mm es igual a  $9/15=0.6$  (60%).

Sin embargo se ha demostrado que las probabilidades calculadas a partir de un ensamble, en la forma en que se describió anteriormente, presentan problemas de confiabilidad y deben ser calibrados. Estos problemas se deben básicamente a la presencia de errores en los modelos y a que los métodos de pronósticos por ensambles actuales no son capaces de representar adecuadamente las diferentes fuentes de incertidumbre dentro del pronóstico. Por este motivo diversos autores desarrollaron métodos para incorporar estas fuentes de incertidumbre a través de un post-procesamiento estadístico de los pronósticos por ensamble, que también puede ser aplicado a pronósticos determinísticos (Hamill y Colucci 1997, 1998, Stensrud y Yussouf, 2007, Raftery y otros, 2005, entre otros). Estudios de estas características también han sido realizados recientemente sobre nuestra región (Ruiz y otros 2008 y 2009).

Para que la calibración sea robusta es necesario disponer de una buena estadística de los errores sistemáticos del sistema de pronóstico utilizado. Para eso, es indispensable contar con un historial de pronósticos lo suficientemente largo, lo cual es difícil de lograr si se tienen en cuenta los cambios permanentes que se realizan sobre los modelos de pronóstico operativos. Es por esa razón, que se torna sumamente atractiva la disponibilidad de los “reforecast” (Hamill y otros, 2006) que es un archivo de pronósticos por ensamble de 15 miembros por día, corrido retrospectivamente desde el año 1979 hasta la actualidad, basados en el modelo MRF (Medium Range Forecast) del NCEP.

Es importante resaltar que la mejora en los pronósticos probabilísticos tiene un gran valor económico y social porque ya que mejora la información utilizada en el proceso de toma de decisiones. Una de las principales ventajas del pronóstico probabilístico es que tiene la capacidad de adaptarse a las necesidades de diferentes usuarios, los cuales pueden tener la posibilidad de tomar una decisión de acción preventiva basados en una relación costo/beneficio. De esta manera cada usuario puede evaluar los costos asociados a un sistema de protección respecto de las pérdidas asociadas a cada evento y actividad en particular. Así, si las pérdidas asociadas a un evento son importantes para un usuario, entonces éste puede tomar medidas preventivas aún cuando la probabilidad del evento sea baja (Zhu y otros, 2002).

Es por ello que los principales centros de pronóstico mundiales han implementado los pronósticos por ensambles de manera operativa, como por ejemplo el NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (Toth y Kalnay, 1993), el ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) (Molteni y otros 1996, Buizza 1997) y el CPTEC (Centro de Previsión del Tiempo y del Clima), (Coutinho 1999), entre otros. En nuestro país a partir del año 2008 el CIMA (Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera) comenzó a generar pronósticos probabilísticos de forma

operativa, utilizando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), cuyas características se describen en Saulo y otros (2008). Este producto y otros similares se pueden encontrar en el siguiente sitio web: <http://wrf.cima.fcen.uba.ar/cuerpo.htm> Estas referencias sugieren que el pronóstico probabilístico se ha convertido en un producto fundamental para un centro de pronóstico operativo.

La precipitación es de particular interés en la región estudiada y conocer su posible evolución en el tiempo es vital para diversas actividades que dependen fuertemente de ello. El objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño de esta metodología para determinar si es viable elaborar con ella pronósticos probabilísticos de precipitación por encima de diferentes umbrales. Por ello, desarrollamos un sistema de búsqueda de análogos para su posterior utilización en el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de precipitación por encima de diversos umbrales. La particularidad de este sistema, comparado con su versión original (Hamill y otros, 2006) es que el método se aplica a datos sobre estaciones y no a un campo analizado de precipitación. Eso genera particularidades en el tratamiento de la metodología que son de interés documentar aquí.

## **DATOS Y METODOLOGÍA**

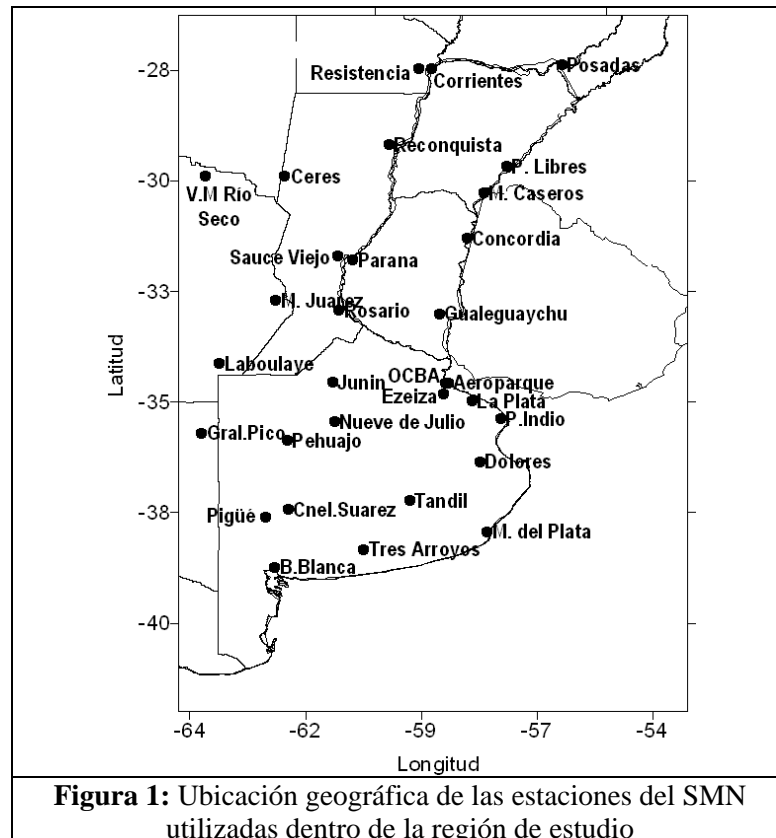
La técnica para la generación de pronósticos a partir de análogos se puede sintetizar de la siguiente manera: primero se compara el pronóstico actual sobre una dada región a un plazo “x” con todos los pronósticos retrospectivos que tengan el mismo plazo de tiempo. Los análogos se obtienen comparando los campos de precipitación pronosticados con la base de datos de pronósticos pasados y reteniendo aquellos campos de pronósticos pasados que se asemejen más al campo de pronóstico actual. Finalmente se agrupan todas las observaciones de precipitación correspondientes a los días en los que el pronóstico fue análogo al pronóstico de los próximos días, y en base a dichas observaciones se estima la probabilidad de ocurrencia de precipitación en los próximos días.

En el presente trabajo se utilizaron los pronósticos diarios del modelo global MRF (Medium Range Forecast), versión anterior del Sistema Global de Pronóstico del NCEP (GFS), con una resolución horizontal aproximada de 2.5° (T62). Este modelo se corre en el NCEP, dependiente de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), con 28 niveles verticales en coordenadas sigma y con él se generan pronósticos por ensamble de 15 miembros, inicializados una vez por día, desde el año 1979 hasta la actualidad. Más detalles acerca de la construcción y variadas aplicaciones de esta extensa base de datos pueden encontrarse en Hamill y otros (2006). Esta base de datos de pronósticos pasados son conocidos como reforecasts y están disponibles a plazos de hasta 14 días en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast/data.html>. En este trabajo en particular, se analizan los pronósticos de precipitación acumulada diaria para plazos de 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12 y 14, limitados a la región centro y noreste de Argentina. Para esto se obtuvieron los datos de precipitación acumulada diaria en la región mencionada en el período 1979-2007 para cada uno de los plazos de interés. Para cada día del período, el NCEP genera un pronóstico por ensambles formado por 15 miembros, inicializados a las 00:00UTC, y a plazos de hasta 14 días con salidas disponibles cada 12 horas.

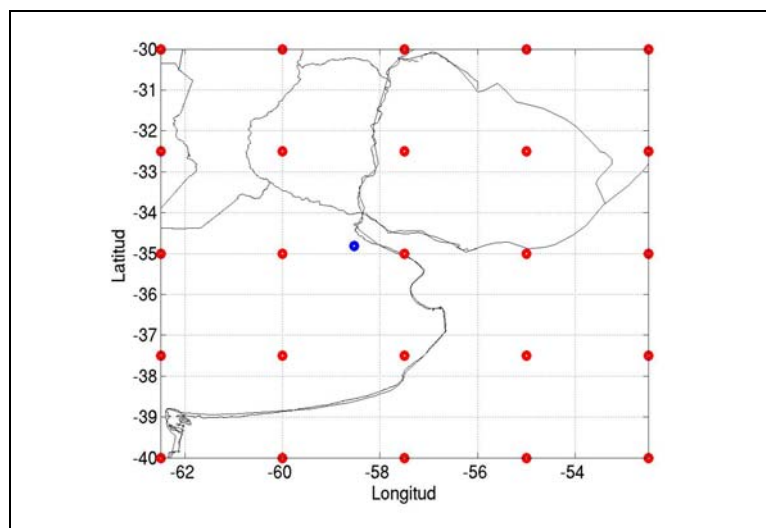
Es importante aclarar que la búsqueda de análogos se realizó sobre los reforecasts correspondientes a la misma estación del año que el pronóstico de partida. Por ejemplo, si tomamos el caso del pronóstico de precipitación del día 01 de Agosto de 2007 se compara sólo con los pronósticos retrospectivos de los meses de Junio, Julio y Agosto de toda la serie. Es decir que dado 1 día, se tiene una base de  $29(\text{años}) \times 3(\text{meses}) \times 30(\text{días}) = 2610$  campos para buscar análogos.

Una consideración importante a tener en cuenta para la aplicación de la técnica es que, como la idea es reemplazar pronósticos por observaciones, entonces es necesario contar con una buena cobertura espacial de observaciones sobre la región en que se buscan los análogos. A diferencia de Hamill y otros (2006), quienes utilizaron datos de reanálisis regional, aquí se han utilizado los datos

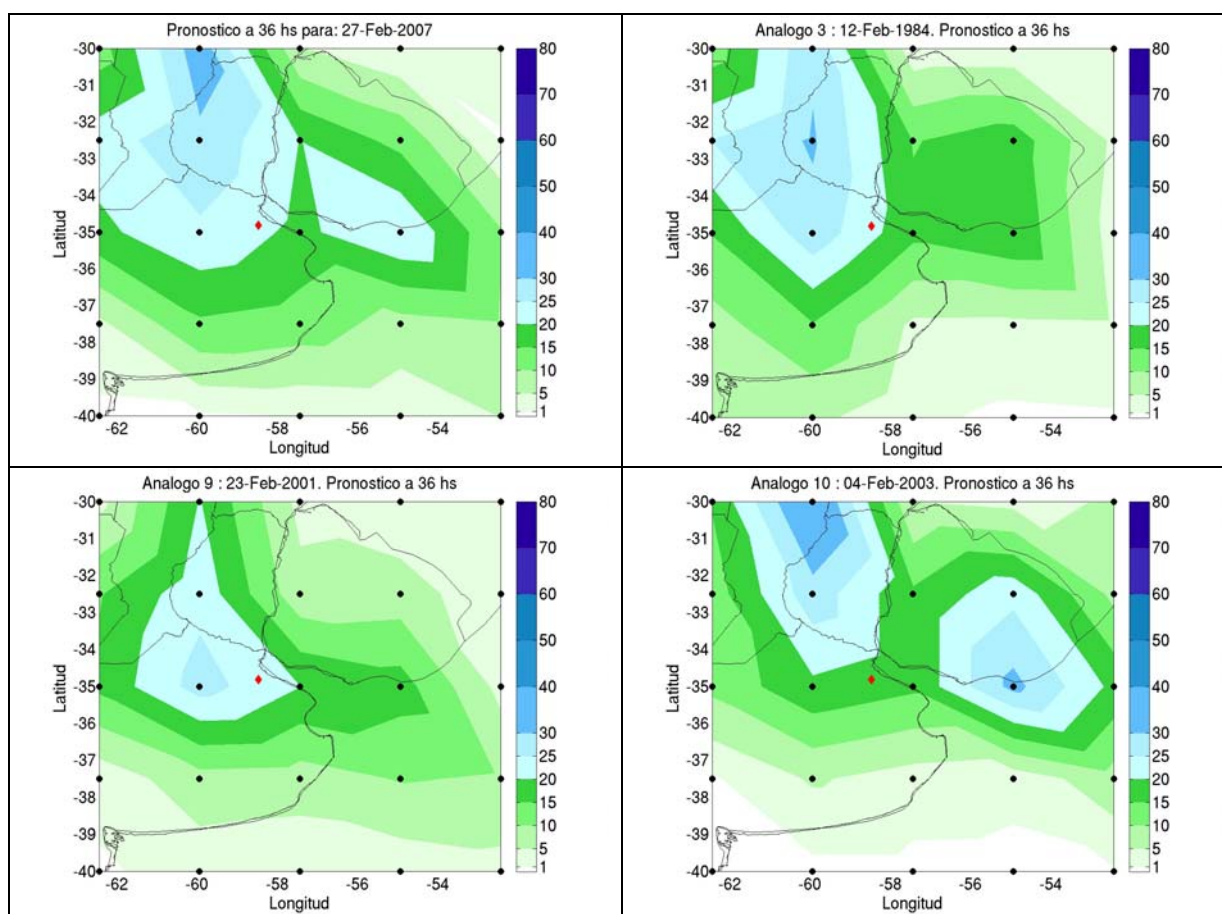
de precipitación diaria de las estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional y se eligieron todas las estaciones dentro de la región de estudio que tuviesen menos de un 90% de datos faltantes en el período 1979-2007 (Figura 1). Esta región se ha elegido porque, por un lado es la zona con mayores cantidades anuales de precipitación, con lo cual el pronóstico de esta variable es de gran interés y de gran valor económico y social. Por otro lado, es la región donde el SMN concentra la mayoría de sus estaciones de superficie, las cuales, por cómo trabaja la técnica, son fundamentales para la aplicación de la misma.



Otra cuestión referente a la técnica que tuvo que ser tratada antes de su aplicación es que la selección de análogos no puede emplearse sobre dominios muy grandes para garantizar la máxima similitud entre cada pronóstico y el conjunto de análogos. Por ello, para cada estación utilizada la búsqueda de análogos se realizó en una “caja” de 1000x1000 km. centrada en cada una de las estaciones. Por ejemplo, si la estación considerada es Ezeiza, la búsqueda de análogos se centró en un dominio de 1000x1000 km alrededor del punto de retícula del modelo que representa la mínima distancia con la posición de Ezeiza, como se puede ver en la Figura 2. Continuando con el ejemplo para Ezeiza, en la Figura 3 se muestra el caso de la búsqueda de análogos para el 27 de Febrero de 2007 en el subdominio reducido. Se muestra el pronóstico de precipitación del modelo numérico sin calibrar a 1 día acompañado de los 3 primeros análogos ordenados de manera ascendente según su grado de similitud, con sus respectivas fechas. Con este ejemplo es claro que los análogos responden a lo esperado, mostrando situaciones en las que el pronóstico fue similar al del día analizado. En el caso del ejemplo, las probabilidades de que la lluvia supere determinados umbrales, se calcularán en base a las observaciones de la estación Ezeiza correspondientes a las fechas de cada uno de estos análogos (se muestran sólo 3 para el caso del ejemplo, pero la cantidad de análogos que se ha retenido en todos los casos es de 75).



**Figura 2:** Subdominio reducido de 1000x1000 km en el cual se realizó la búsqueda de análogos en el caso de Ezeiza, centrado en el punto de retícula más cercano a dicha estación (Punto azul: estación Ezeiza del SMN. Puntos rojos: puntos de retícula del modelo)



**Figura 3:** Pronóstico a 1 día de precipitación acumulada diaria (mm). Arriba izquierda: caso de referencia (i.e el campo pronosticado), paneles restantes: campos de análogos más similares. Rombo rojo: ubicación de Ezeiza, puntos negros: puntos de retícula del modelo (ver carteles en cada gráfica para mayor información).

Para estudiar y documentar el potencial de esta técnica se han repetido los experimentos para diferentes umbrales de precipitación. Es decir, cada verificación realizada se ha llevado a cabo reteniendo 75 análogos para los siguientes umbrales: 1.0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 y 40 mm.

Estos resultados, han sido comparados entre sí y también con el pronóstico probabilístico generado a partir de los 15 miembros del ensamble sin calibración aplicada. En el caso en el que se tuvo en cuenta el pronóstico del ensamble sin calibrar, se han utilizado los miembros del ensamble por separado, para lograr la construcción del pronóstico probabilístico por encima de los umbrales mencionados.

Para evaluar la calidad de los sistemas de pronósticos probabilísticos existen diversos índices (ver Anexo I, Ruiz, 2009), entre los cuales uno de los más utilizados es el índice de Brier (BR) (Brier, 1950), cuya expresión se puede ver en la ecuación 1.

$$BR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \quad (1)$$

$O_i$  es la probabilidad observada y vale 1 cuando el evento ocurrió y 0 cuando no, y  $p_i$  es la probabilidad pronosticada. N es la cantidad de pares de pronóstico/observación disponibles dentro del período a verificar.

En este trabajo se utilizó el índice de acierto de Brier ó, según su nombre en inglés, el Brier Skill Score (BSS), en el cual se compara el BR con un BR de referencia. El BR de referencia aquí utilizado es el BR de la climatología. El BSS se define a través de la ecuación 2.

$$BSS = 1 - \frac{BR}{BR_{climatología}} \quad (2)$$

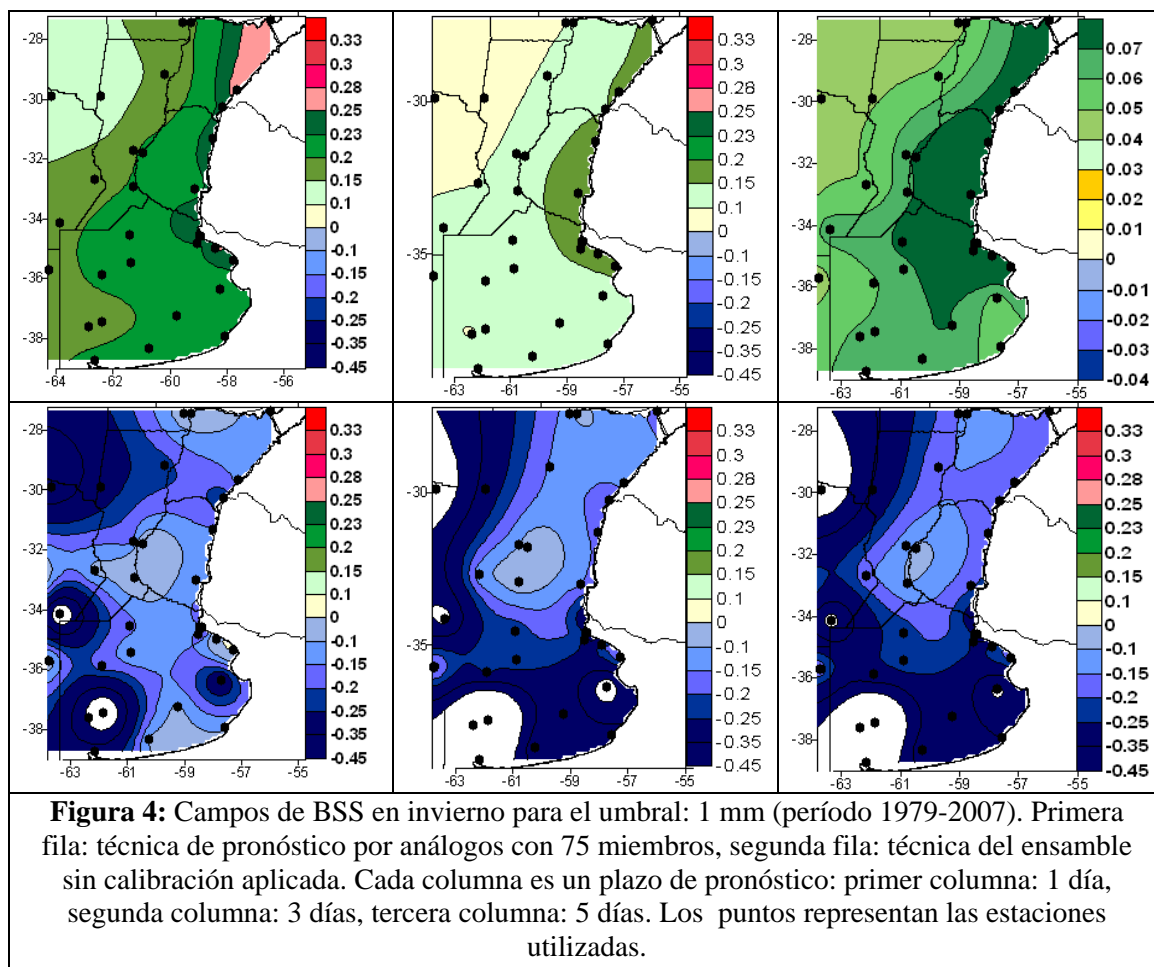
Teniendo en cuenta que el valor óptimo de BR es 0, se deduce de la ecuación 2 que el valor óptimo de BSS es 1. Valores positivos de BSS indican que la calidad del pronóstico es mejor que la climatología.

El índice de acierto de Brier se calculó para cada estación del SMN, para el pronóstico de precipitación por encima de los diferentes umbrales generado a partir de: la técnica de los análogos con 75 análogos y el pronóstico generado a partir del ensamble sin calibrar.

## RESULTADOS

A continuación, para mostrar cómo la técnica de los análogos permite mejorar la calidad del pronóstico probabilístico de precipitación sobre la región de estudio, se presentan campos de BSS para algunos umbrales y para algunos de los plazos trabajados. Para generarlos se han utilizado los BSS de todas las estaciones del SMN y utilizando una interpolación Kriging, han sido calculados para los dos sistemas de pronóstico mencionados en la sección previa. Es importante aclarar que en las regiones donde no hay una cobertura espacial densa de estaciones, estos campos deben tomarse con precaución, dado que los valores de BSS allí son producto de la técnica de interpolación.

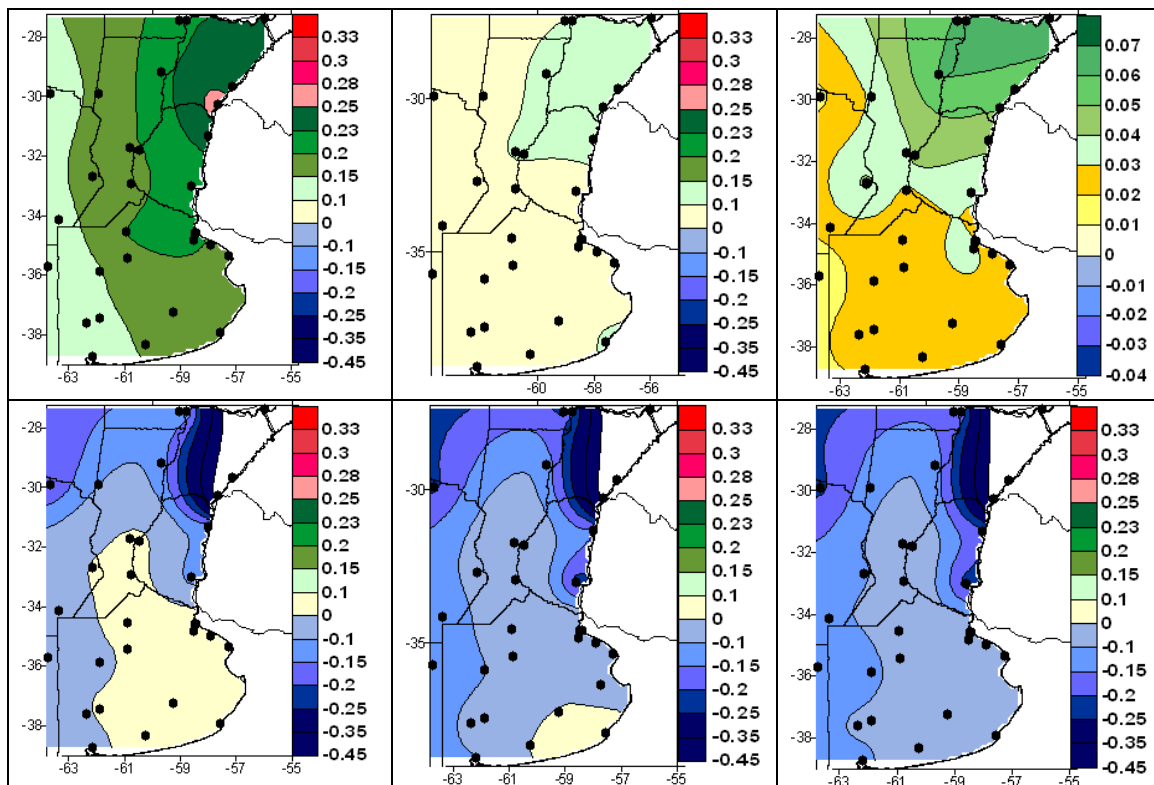
En la Figura 4 se pueden observar los campos de BSS para todas las estaciones utilizadas en el período 1979-2007. Allí se muestran los BSS correspondientes al umbral de 1 mm para los plazos de 1, 3 y 5 días para el trimestre de invierno. Las columnas corresponden a los diferentes plazos de pronóstico. Se observa que la técnica de pronósticos por análogos presenta un mejor desempeño que el del ensamble sin calibrar para los 3 plazos de pronóstico mostrados. En particular la técnica de pronósticos por análogos presenta su máximo BSS en la región del noreste del Litoral para 1 día de plazo.



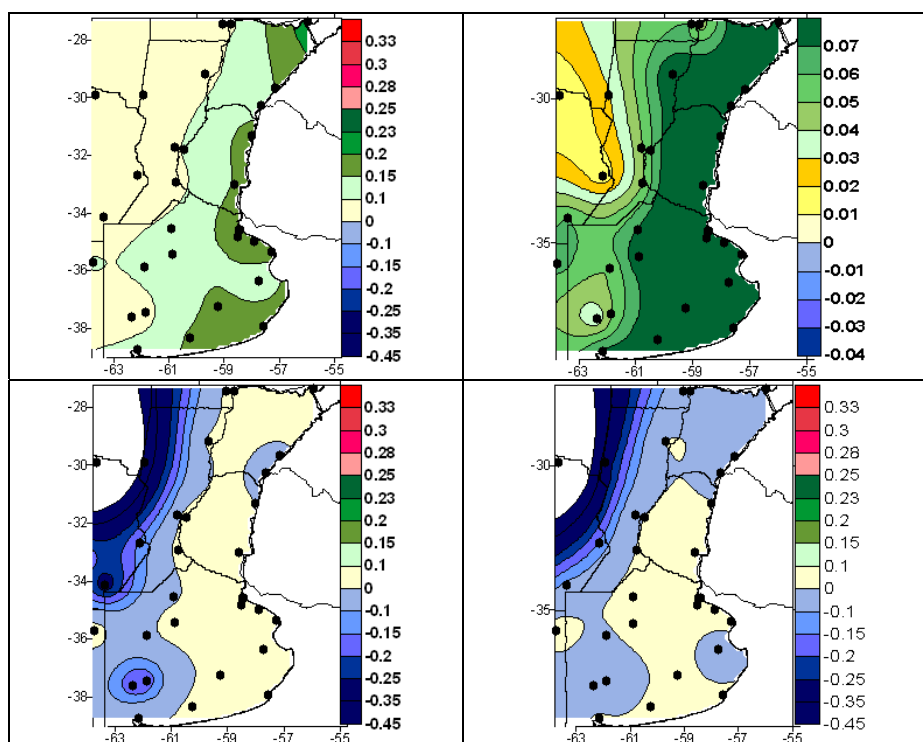
La Figura 5 muestra los campos de BSS para el umbral 1 mm, en el trimestre de verano. Como es esperable el mejor desempeño se encuentra para 1 día de pronóstico en el noreste de la región. En líneas generales el índice disminuyó sus valores en la mayoría de las estaciones respecto del invierno.

Los resultados de este análisis hecho para el umbral de 1 mm nos están dando la información de que estas técnicas son buenas herramientas que pueden diferenciar entre la ocurrencia o no ocurrencia de precipitación. Esta información puede ser de gran utilidad para diversas áreas, de acuerdo a su aplicación.

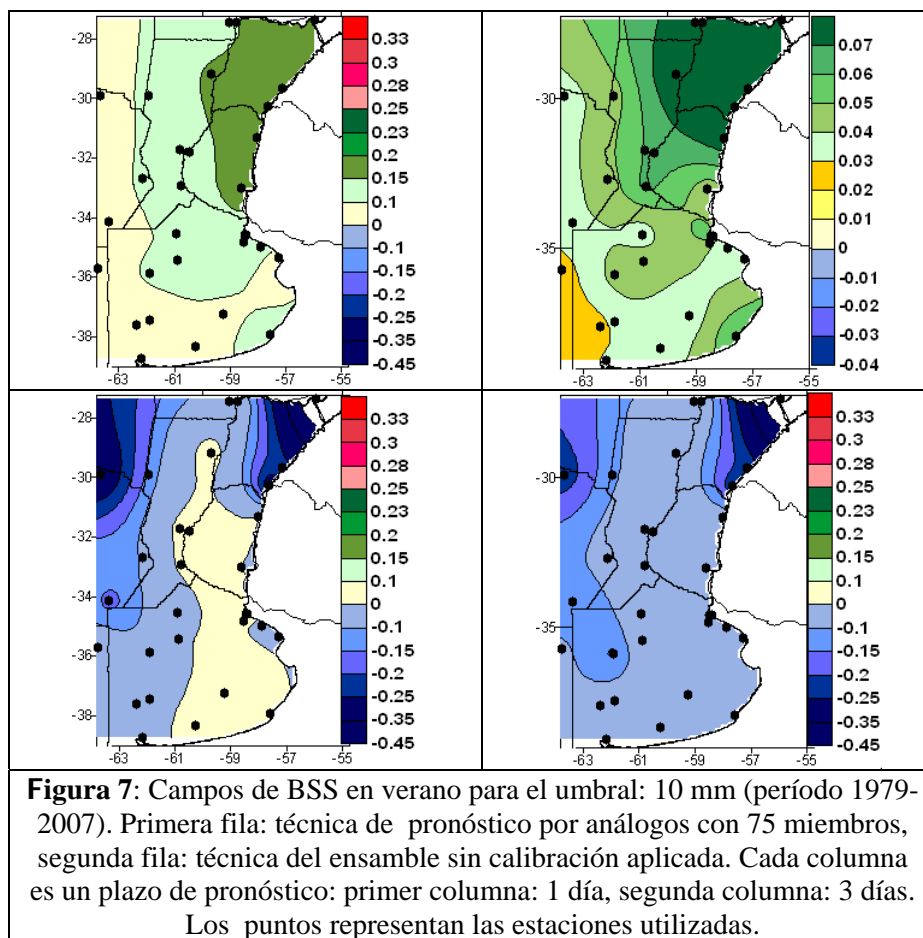
Las Figuras 6 y 7 muestran los campos de BSS para el umbral de 10 mm, para el invierno y el verano, respectivamente para 1 y 3 días de pronóstico. De manera similar al caso de 1 mm, si bien se ven mejoras en la calidad de los pronósticos, los índices presentan menores valores en el trimestre de verano.



**Figura 5:** Campos de BSS en verano para el umbral: 1 mm (período 1979-2007). Primera fila: técnica de pronóstico por análogos con 75 miembros, segunda fila: técnica del ensamble sin calibración aplicada. Cada columna es un plazo de pronóstico: primer columna: 1 día, segunda columna: 3 días, tercera columna: 5 días. Los puntos representan las estaciones utilizadas.



**Figura 6:** Campos de BSS en invierno para el umbral: 10 mm (período 1979-2007). Primera fila: técnica de pronóstico por análogos con 75 miembros, segunda fila: técnica del ensamble sin calibración aplicada. Cada columna es un plazo de pronóstico: primer columna: 1 día, segunda columna: 3 días. Los puntos representan las estaciones utilizadas.



## CONCLUSIONES

En base a lo discutido previamente queda en claro que la aplicación de la técnica de los pronósticos por análogos a una serie extensa de pronósticos retrospectivos representa múltiples ventajas. Una de ellas es que su aplicación genera una mejora marcada en la calidad de los pronósticos, como se pudo ver a través del índice de acierto de Brier. Otra ventaja sobresaliente es que para lograr esta mejora, no se necesita disponer de un modelo de alta resolución, aunque es de esperar que la aplicación de una técnica semejante a un sistema de pronóstico con mayor resolución resulte en ventajas aún mayores. Lamentablemente, actualmente no se dispone de un archivo de pronósticos retrospectivos de mayor resolución que la utilizada aquí. Dado el potencial de esta técnica y la importancia de obtener pronósticos probabilísticos de precipitación en nuestra región, es recomendable que el Servicio Meteorológico Nacional en un futuro pueda generar sus propios pronósticos retrospectivos.

Un aspecto importante a tener en cuenta en este trabajo es que la aplicación de la técnica de análogos fue hecha a estaciones particulares en lugar de campos como lo hecho en Hamill y otros (2006). Es claro que las estaciones disponibles utilizadas aquí no están distribuidas uniformemente, lo cual muy probablemente afecte el buen desempeño de la técnica de análogos. Una de las opciones consideradas para mejorar ese aspecto es la de utilizar un set de datos de precipitaciones estimadas combinando datos de superficie y de sensores remotos. Lamentablemente no existe actualmente un set de datos de precipitación diaria de la longitud utilizada aquí. Los más extensos comienzan en el año 1997 o posteriormente. Esto quiere decir que de utilizar otro set de datos habría que sacrificar la longitud de la serie, lo cual limitaría la búsqueda de análogos a un historial menor de pronósticos y probablemente afectaría el buen funcionamiento de la técnica.

Sin embargo y a pesar de esta limitación, los resultados mostrados resultan alentadores dada la notable mejora en el desempeño de los pronósticos probabilísticos. Para los plazos más altos, superiores a los 5-7 días, los valores de BSS disminuyen marcadamente, no brindando mayor información de la que brinda la climatología, con lo cual esto nos muestra un límite: el límite de hasta dónde es de utilidad la información dada por esta metodología de pronósticos, al menos con las consideraciones hechas aquí. En parte, esto seguramente está dado por la limitación intrínseca que tienen los modelos de predicción numérica para pronosticar estados futuros de la atmósfera.

Es interesante mencionar que el set de datos de pronósticos retrospectivos presenta más variables disponibles, entre ellas temperatura a 2 metros, altura geopotencial, componentes del viento a 10 metros, entre otras, en el mismo período de 1979 hasta la actualidad. Si bien la cantidad de variables guardadas es limitada debido a la extensión de la serie, las que están disponibles nos dan la posibilidad de desarrollar trabajos similares a éste pero aplicados a otras variables de interés (se podrían obtener por ejemplo promedios semanales de temperatura o precipitación en el corto y mediano plazo, entre otros productos).

La disponibilidad de este set de datos y los resultados discutidos aquí sugieren que la idea de generar pronósticos probabilísticos de precipitación de manera operativa aplicando la técnica de análogos se torne no solo atractiva, sino también viable para el Servicio Meteorológico Nacional. Trabajos futuros se concentrarán en la implementación de este potencial producto.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido posible gracias a los siguientes proyectos GC06-085 de la NOAA/OGP/CPPA; ANPCyT PICT 2004 25269, UBACyT X204 y CONICET PIP 5417.

## BIBLIOGRAFÍA

**Brier, G. W.,** (1950) “*Verification of Forecasts Expressed in Terms of Probability*”. Montly Weather Review **78**, 1-3.

**Buizza R.,** (1997) “*Potential Forecast Skill of Ensemble Prediction and Spread and Skill Distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System*”. Monthly Weather Review **125**, 99–119.

**Coutinho, M. M.** (1999). *Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais*. São José dos Campos. 136p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**Hamill T. and S. J. Colucci,** (1997) *Verification of Eta-RSM Short-Range Ensemble Forecast*. Monthly Weather Review., **125**, 1312-1327.

**Hamill T. and S. J. Colucci,** 1998. “*Evaluation of Eta-RSME Ensemble Probabilistic Precipitation Forecast*”. Monthly Weather Review., **126**, 711-724.

**Hamill T. and J. Whitaker,** (2006). “*Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on Reforecast Analogs: Theory and Application*”. Monthly Weather Review. **134**, 3209-3229.

**Hamill, T., J. Whitaker y S. Mullen,** (2006). *Reforecasts. An important data set for improving weather predictions*. Bull. Am. Met. Soc, 33-46.

**Lorenz E. N.**, (1963). *Deterministic Nonperiodic Flow*. Journal of the Atmospheric Sciences, **20**, 130-141.

**Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliaigis**, (1996). *The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation*. Quart, J. Roy. Meteor. Soc., **122**, 73-119.

**Raferty, A., T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakowski**, (2005). “*Using Bayesian Model Averaging to Calibrate Forecast Ensembles*”. Monthly Weather Review. 133, 1155-1174

**Ruiz, J. J., A. C. Saulo and E. Kalnay**, (2008). *Comparison of methods to generate probabilistic quantitative precipitation forecasts over South America*. Weather and Forecasting. Vol. 24, Issue 1, 319-336 DOI: 10.1175/2008WAF2007098.1

**Ruiz, J.**, (2009). *Aplicación de los pronósticos por ensambles a la predicción del tiempo a corto plazo sobre Sudamérica*. Tesis doctoral, Depto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.

**Saulo, C., S. Cardazzo, J. Ruiz, C. Campetella, A. Rolla**, (2008). “*El sistema de pronóstico experimental del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera*”, Meteorológica, vol. 33, 83-97.

**Stensrud, D. and N. Yussouf**, (2007). *Reliable Probabilistic Quantitative Precipitation Forecast from a Short-Range Ensemble Forecasting System*. Weather and Forecasting, **22**, 3-17.

**Toth, Z. y E. Kalnay**, (1993). *Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations*. Bulletin of the American Meteorological Society, **74**, 2317-2330

**Zhu Y., Z. Toth, R. Wobus, D. Richardson, and K. Mylne** (2002). *The Economic Value of Ensemble-Based Weather Forecast*. Bulletin of the American Meteorological Society, **83**, 73-83.