

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

**SISTEMA DE PRONÓSTICO EXPERIMENTAL EN ALTA RESOLUCIÓN CON EL
MODELO BRAMS**

Cynthia Matsudo¹, Yanina García Skabar^{1,2,3,4}, Lorena Ferreira¹, Juan Ruiz^{4,5,6}, Paola Salio^{4,5,6},
Luciano Vidal^{1,3}, Matilde Nicolini^{4,5,6}

¹Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina.

²Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, Argentina.

³CONICET, Buenos Aires, Argentina.

⁴UMI-Instituto Franco Argentino sobre Estudios del Clima y sus Impactos, Buenos Aires, Argentina.

⁵Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina.

⁶Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y
Naturales, UBA, Buenos Aires, Argentina.

(Manuscrito recibido el 7 de noviembre de 2012, en su versión final el 22 de marzo de 2013)

RESUMEN

Este trabajo presenta las características del sistema de pronóstico numérico en alta resolución basado en el modelo BRAMS en su versión 4.2, diseñado para el pronóstico de tormentas en la región pampeana y que se procesa en forma experimental en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se realiza una descripción del sistema de pronóstico mostrando un caso de estudio y una primera evaluación de la calidad del mismo. En particular, se presentan los resultados de la verificación operativa de los pronósticos aplicando metodologías adecuadas para pronósticos en alta resolución. Se hace hincapié en la necesidad de utilizar información provista por sensores remotos que cuenten con una mayor resolución espacial y temporal que las utilizadas habitualmente. Asimismo, se muestran los resultados de la aplicación de la metodología de los pronósticos probabilísticos a la precipitación y se examinan las ventajas de su utilización dada la incorporación de la incertidumbre asociada a las simulaciones numéricas de la atmósfera.

Palabras clave: pronóstico de precipitación, modelos numéricos, alta resolución

**EXPERIMENTAL HIGH-RESOLUTION FORECAST SYSTEM WITH THE BRAMS
MODEL**

ABSTRACT

This work presents the characteristics of a high-resolution numerical forecast system using the BRAMS model version 4.2 designed for the forecast of storms in the Pampa region which is processed on daily basis at the National Meteorological Service of Argentina (NMS). The forecast system is described by showing a case study and a first evaluation of its quality. In particular, the results of rainfall forecasts

are presented with an operational verification scheme which implies the application of adequate methodologies for high-resolution forecasts. We discuss the availability of remote sensing data with higher spatial and temporal resolutions than the ones usually used. Finally, the results of rainfall probabilistic forecasts are shown and we examine the advantages of this tool as a value-added product giving the incorporation of the uncertainty associated to the numerical simulations of the atmosphere.

Keywords: precipitation forecast, numerical models, high resolution

1. INTRODUCCIÓN

La región Sudeste de Sudamérica es una de las regiones del mundo afectada por la presencia de los sistemas convectivos de mesoescala más intensos (Goodman y Cecil 2002; Zipser et al 2006; Vidal 2009). Dado que, en algunos casos la convección húmeda profunda y los fenómenos severos asociados como la ocurrencia de granizo, vientos fuertes, tornados y actividad eléctrica son responsables de desastres en la Argentina, es de crucial importancia desarrollar un pronóstico con la mayor precisión posible. En la actualidad, este tipo de fenómenos, no siempre es pronosticado por los modelos operativos regionales y es evidente la necesidad de contar con herramientas que posibiliten un pronóstico de los mismos lo más exacto posible.

Lograr un mejor pronóstico de este tipo de fenómenos requiere avanzar en distintas líneas de investigación y desarrollo. Una de ellas es el modelado numérico en alta resolución. Desde noviembre de 2010, se encuentra operativo en forma experimental en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) el modelo atmosférico de pronóstico Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) en su versión 4.2 (García Skabar et al, 2011). Esto fue posible gracias a un esfuerzo conjunto de diferentes proyectos en ejecución del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires (DCAO-UBA), del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA-UBA-CONICET) en interacción con el Departamento de Investigación y Desarrollo del SMN. Actualmente, esta versión es la de mayor resolución implementada opera-

tivamente en el país.

En los centros de pronóstico de diferentes países a medida que se alcanzó una mayor capacidad de cómputo se fueron generando pronósticos determinísticos con mayor resolución tanto espacial como temporal (Kalnay, 2003; Lean et al, 2008) así como pronósticos por ensambles (Epsstein, 1969 y otros) y en consecuencia, productos que proveen una medida de la incertidumbre de los mismos. En tal sentido, la generación de pronósticos probabilísticos (PP) objetivos, es una respuesta a dicha necesidad. Se han propuesto diferentes metodologías para obtener PP confiables (Hamill y Colucci, 1997, 1998; Gallus, y Seagal, 2004; Stensrud. y Yussouf, 2007). Con el fin de aprovechar al máximo las ventajas del pronóstico probabilístico, es necesario que el mismo sea confiable en términos estadísticos. La confiabilidad de los PP entendida como la relación entre la probabilidad pronosticada y la frecuencia observada del evento, puede mejorarse mediante diferentes métodos de calibración estadística de los pronósticos. En este trabajo se implementará la metodología utilizada por Gallus y Seagal (2004) a partir de los pronósticos de precipitación determinísticos de alta resolución previamente generados. Es importante destacar, que la metodología seleccionada no requiere de un ensamble para proveer información de la incertidumbre asociada al pronóstico. Esta alternativa es adecuada en este caso ya que requiere un costo computacional mucho menor que generar un ensamble en alta resolución y por tanto permitiendo, al mismo tiempo, una utilización más eficiente de la información meteorológica incorporando la incertidumbre asociada a las simulaciones numéricas de la atmósfera. Esta metodología ha sido evaluada sobre la región, tal

como se describe en Ruiz y Saulo (2011), Ruiz et al (2009), pero aplicada a pronósticos de escala regional con una resolución horizontal menor a 20 km. Una revisión bibliográfica que muestra algunos antecedentes en la evolución de los PP disponibles para nuestra región puede encontrarse en Aldeco (2011).

La validación y verificación de los resultados de un sistema de pronóstico permite obtener una evaluación en la calidad de los pronósticos generados.

La verificación debe ser cuantitativa y permitir evaluar el desempeño del modelo en función al tipo de sistemas que se pretende pronosticar, para lo cual es primordial considerar la escala de los procesos a verificar. A nivel internacional se pueden citar trabajos en los que se verifican pronósticos numéricos con resoluciones menores a 10 km donde la convección se resuelve explícitamente (Fowle y Roebber, 2003; Weisman et al, 2008; Kain et al, 2008; entre otros). Todos ellos, aplicando diferentes metodologías, contrastan el pronóstico de alta resolución con información derivada de radar y redes pluviométricas de gran densidad espacio-temporal. Los autores plantean que la verificación de un fenómeno tan pequeño, intenso y específico en tiempo y espacio como las tormentas representa un gran desafío ya que éstas no pueden ser evaluadas mediante las técnicas estándar de verificación. Proponen verificar otras características de la convección como el modo y la evolución de la misma que resultan críticas para evaluar el valor agregado de un pronóstico de alta resolución.

Existen métodos que resultan más representativos de la variabilidad espacial y temporal de los sistemas característicos de la mesoescala como los de verificación difusa resumidos por Ebert (2008), que serán aplicados en el presente trabajo. Por otra parte, existen también metodologías basadas en criterios espaciales como la propuesta por Ebert y McBride (2000) que identifican áreas contiguas de precipitación (CRA, Contiguos Rain Areas) en el campo del pronóstico como en las observaciones. Este enfoque permite

evaluar características de los sistemas de precipitación e identificar los errores asociados con la ubicación, tamaño, intensidad y patrones de pequeña escala.

El objetivo del presente trabajo es describir el sistema experimental de pronóstico con el modelo BRAMS en alta resolución en el Servicio Meteorológico Nacional mostrando resultados de su desempeño en el pronóstico de la precipitación para dos temporadas de verano 2010-2011 y 2011-2012. Asimismo, a través de un caso particular se muestran los productos que se generan diariamente y se discute las limitaciones que presenta la configuración del modelo, la metodología utilizada para generar los pronósticos probabilísticos y los esquemas de verificación aplicados.

2. METODOLOGÍA

2.1. El modelo BRAMS

Los pronósticos son generados con el modelo BRAMS en su versión 4.2 cuya descripción general puede encontrarse en Freitas et al (2009) y está disponible libremente en internet en <http://brams.cptec.inpe.br/>. La implementación operativa en el SMN (García Skabar et al, 2011) utiliza una configuración que consta de 2 retículas anidadas de 8 y 2 km de resolución horizontal con anidado interactivo que abarca aproximadamente 800 km² cubriendo principalmente la región centro-norte de la provincia de Buenos Aires (ver Figura 1, G1 y G2 respectivamente). La coordenada vertical es la híbrida sigma-zeta ($\sigma - z$) que sigue el terreno y consta de 50 niveles con una resolución vertical variable que va desde 20 m cerca de superficie hasta 1000 m en el tope del dominio. En ambos dominios la convección se resuelve explícitamente y se utiliza una parametrización de la microfísica de nubes de dos momentos que considera 7 especies: agua de nube, lluvia, hielo prístino, nieve, agregados, graupel y granizo (Meyers y otros, 1997). Las condiciones iniciales y de borde son provistas cada 3 horas por pronósticos del modelo ETA operativo en el SMN (Suaya y Valdivieso, 2009)

inicializados a las 12 UTC con resolución horizontal de 25 km. El modelo BRAMS se inicializa a las 18 UTC y los pronósticos se realizan hasta un plazo de 18 horas, con salidas disponibles cada 10 minutos. Trabajos previos muestran la presencia de un máximo nocturno en la actividad convectiva en la región de interés (Salio et al, 2007; Vidal, 2009), lo cual sumado a las limitaciones computacionales existentes nos impone procesar un único ciclo de pronóstico diario que cubre solamente las horas de la noche. En particular en este trabajo, y con el fin de focalizar el análisis en la evaluación de los pronósticos de precipitación se utilizaron las salidas correspondientes a la precipitación acumulada cada 10 minutos. Posteriormente, se calcularon valores de precipitación acumulada en el periodo de 12 horas comprendido entre las 00 y 12 UTC en el área G1 que abarca el dominio de 8 km de resolución del modelo presentado en la Figura 1.

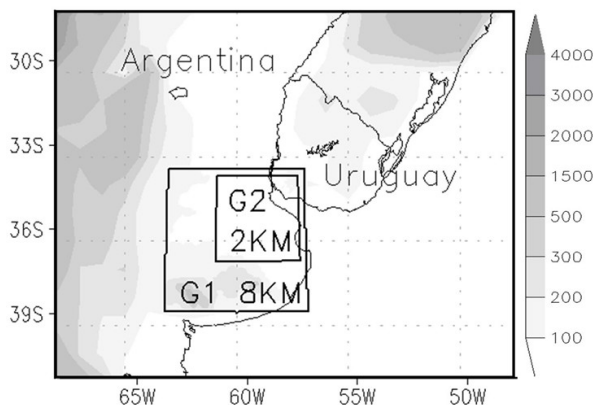


Figura 1: Dominios de integración del sistema de pronóstico BRAMS G1 y G2 con resoluciones horizontales de 8 y 2 km respectivamente. Se sombrea la topografía indicada en metros.

La elección de la región de estudio se determinó en base a que es la región de Argentina que presenta la mayor densidad de población afectada por este tipo de fenómenos y que, al mismo tiempo, cuenta con la disponibilidad de diferentes fuentes de información de alta resolución. En particular, se ubica dentro de la zona de cobertura de los radares meteorológicos que están operando actualmente, ubicados en Ezeiza (34.76°S ,

58.51°O) y Pergamino (33.94°S , 60.56°O). Si bien en esta instancia no se ha utilizado la información provista por los radares se espera poder incorporarla en trabajos futuros.

Dado el interés de estudiar el pronóstico de la actividad convectiva frecuente durante la época estival, el periodo de estudio está comprendido por dos temporadas de verano: dic2010-feb2011 y dic2011-feb2012.

2.2. El pronóstico probabilístico

Uno de los antecedentes fue presentado por Gallus y Seagal (2004), quienes mostraron que existen técnicas para obtener PP confiables a partir de pronósticos determinísticos de una sola corrida en una región central de Estados Unidos. En Argentina, Ruiz et al (2009) analizaron la generación de PP utilizando una única corrida del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y un conjunto previo de pronósticos del mismo modelo con la misma configuración. Muchos de los antecedentes han aplicado estas técnicas a pronósticos para plazos entre 24 a 48 hs con desempeños comparables a los pronósticos por ensambles. Para plazos más largos, se consideró que los pronósticos por ensambles son más adecuados (Saulo et al, 2008).

En este trabajo se generan los PP para diferentes umbrales de lluvia a partir de los pronósticos de precipitación acumulada a 12 horas generados por el modelo BRAMS. Para generar los PP es necesario realizar un proceso de calibración para que estos PP sean confiables estadísticamente, es decir, se busca que las probabilidades pronosticadas sean próximas a las frecuencias observadas dado un cierto valor umbral de probabilidad pronosticado. Esto significa que un pronóstico confiable es aquel en donde los valores de probabilidad pronosticados son consistentes con la incertidumbre asociada al pronóstico del evento. Para la calibración se utiliza un periodo de entrenamiento dinámico el cual considera un número N de días previos a cada pronóstico. La elección de la longitud de este periodo depende de varios factores como ser la disponi-

bilidad de observaciones y el régimen de precipitación presente. El caso óptimo sería considerar el mayor plazo posible dentro de una misma época del año. Estudios previos para nuestra región como los de Saulo et al (2008) y Cardazzo et al (2010) utilizan al menos 20 días de observaciones para generar estadísticos estables a partir de PP de precipitación acumulada a 24hs generados con el modelo WRF calibrado con datos del Global Telecommunication System (GTS) y estimaciones satelitales de precipitación CMORPHing Technique (CMORPH, Joyce et al, 2004) según Saulo et al (2008).

2.3. Verificación de los pronósticos

Con el objetivo de verificar los pronósticos de precipitación se utilizaron datos provenientes de estimaciones satelitales CMORPH dado que no se dispone de fuentes de información de superficie con alta densidad espacio-temporal que cubran toda la región de estudio. Estos datos se generan a partir de información en los canales del infrarrojo y de microondas pasivas y están disponibles globalmente con una resolución espacial de 8 km en el Ecuador y temporal de 30 minutos. Si bien existen otras estimaciones satelitales de precipitación que resultan una alternativa válida, la ventaja que presentan los datos CMORPH es que cuentan con una resolución espacial similar a la del modelo que queremos evaluar. Sin embargo, es necesario considerar sus limitaciones y falencias en la región de Sudamérica (Ruiz, 2009; Hobouchian et al, 2012) a la hora de analizar los resultados. Estos datos se encuentran disponibles un día después de cada pronóstico en http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html. Dado que su resolución temporal es de 30min, para su uso en la verificación fueron acumulados desde las 00 a las 12UTC.

2.3.1. Metodología para la verificación de pronósticos determinísticos

En primer lugar, con el fin de verificar los pronósticos diarios de precipitación acumulada

a 12 horas la retícula del modelo fue interpolada a la retícula de las estimaciones CMORPH de modo de contar con bases de datos compatibles. En consecuencia, se trabajó con una resolución espacial de 8 km.

Se calcularon para todo el periodo de estudio los estadísticos utilizados habitualmente para describir el desempeño del modelo: ETS, BIAS score, POD y FAR definidos como en Hamill (1999) para los umbrales 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 30, 50, 60 mm.

Dentro de los diversos tipos de métodos de verificación existentes en la bibliografía, se encuentran los llamados métodos de verificación “difusa” (fuzzy/neighborhood verification). A diferencia de los categóricos que evalúan los pronósticos en forma puntual, estos últimos utilizan vecindades de puntos (tanto espacial como temporalmente) lo cual permite considerar incertezas inherentes a la pequeña escala (Ebert, 2008). Una de las ventajas que presentan estos métodos es que consideran la utilidad de las áreas pronosticadas que se hallan cercanas pero no superpuestas a las observadas y por otra parte, permiten comparar la calidad de los pronósticos en distintas escalas. Uno de los índices que surgió a partir de estos métodos es el Fractional Skill Score (FSS) propuesto por Roberts y Lean (2008). El FSS compara las probabilidades de ocurrencia de precipitación (por encima de un umbral) pronosticadas y observadas en la vecindad de cada punto de retícula tomando entornos de distintos tamaños que se corresponden con diferentes escalas espaciales. Para el cálculo de este estadístico se consideraron los mismos umbrales que en los estadísticos categóricos. Se asume que el área de estudio presenta un comportamiento homogéneo en el régimen de lluvias por lo que el valor del índice se considera representativo de toda la región. En este trabajo se consideraron vecindades cuadradas que van desde 1 punto (8 km de lado) hasta 20 puntos de retícula (aprox. 160 km) de lado.

Por otra parte, se aplicó una técnica de verificación espacial por objetos desarrollada por Ebert

y McBride (2000) que identifica patrones de precipitación definidos como “entidades” o áreas contiguas de precipitación (CRAs). El método busca comparar las propiedades de las “entidades” que se corresponden en los campos pronosticado y observado, entendiendo como “entidades” aquellas áreas de precipitación definidas a partir de un valor umbral en la intensidad de la precipitación. Para ello, ambos campos son interpolados a una retícula común superponiéndolos y considerando el máximo valor en cada punto de grilla. De esta manera, cada objeto denominado CRA, se identifica en el campo combinado lo que asegura la correspondencia entre esas entidades. Para ajustar las entidades observadas y pronosticadas al CRA se efectúa un desplazamiento horizontal de la entidad pronosticada sobre la observada dentro de una “caja”, en nuestro caso, de 5° de lado. Este procedimiento se realiza hasta que cumple con un criterio de mejor ajuste como la minimización del error medio cuadrático (RMSE) al igual que en Ebert y McBride (2000). Un atributo de este método de verificación es que cuantifica el RMSE total del pronóstico original en base a una descomposición debidos a tres factores: la localización, volumen y errores en el patrón de precipitación para las 4 CRAs de mayor tamaño (Ebert y Gallus, 2009). Esta metodología no fue aplicada a todo el período de estudio debido a que requiere un análisis particular de cada caso. En muchas situaciones los CRAs no son correctamente desplazados por la limitación del dominio y además cada caso requiere un ajuste de umbrales críticos para la detección y desplazamiento de las entidades. Se aplicó la misma metodología descrita en Matsudo et al (2012) para un caso de estudio con la finalidad de buscar patrones de precipitación mayores a 20mm para la precipitación acumulada entre las 00 y las 12UTC del día 31 de enero de 2012.

2.3.2. Metodología para la verificación de pronósticos probabilísticos

Para evaluar la calidad de los sistemas de los PP existen diversos índices (ver Saulo et al, 2008). En particular, en este trabajo se utilizó el índice

de acierto de Brier ó, según su nombre en inglés, el Brier Skill Score (Brier, 1950) que queda definido de la siguiente forma:

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

donde se compara el BR (Brier Score, Murphy, 1973) del pronóstico con un BR de referencia, en este caso el de la climatología. El BR dado por

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

donde o_i vale 1 cuando el evento ocurrió y 0 cuando no ocurrió (en este sentido o_i representa la probabilidad que un pronóstico perfecto debería haberle asignado a la ocurrencia del evento) y p_i es la probabilidad pronosticada, y N es la cantidad de pares de pronóstico/observación disponibles dentro del período a verificar. El BR climatológico se calcula reemplazando p_i por la probabilidad climatológica del evento. 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 el pronóstico aporta más información que el mero conocimiento del comportamiento climatológico de la variable en cuestión. La evaluación del desempeño de los PP, a través de estos índices, se realizó para todo el periodo de estudio considerando los umbrales utilizados para el cálculo de los estadísticos categóricos descriptos en la sección 2.3.1. Asimismo, para el proceso de calibración se utilizaron las estimaciones CMORPH con un periodo de entrenamiento de 20 días. Por último se calculó un diagrama de confiabilidad el cual muestra la relación entre las probabilidades pronosticadas y las frecuencias observadas para cada umbral considerado.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación de la calidad del pronóstico sobre todo el período de estudio

En esta sección se muestran algunos resultados generales del análisis estadístico correspondiente a los 2 periodos de verano considerados

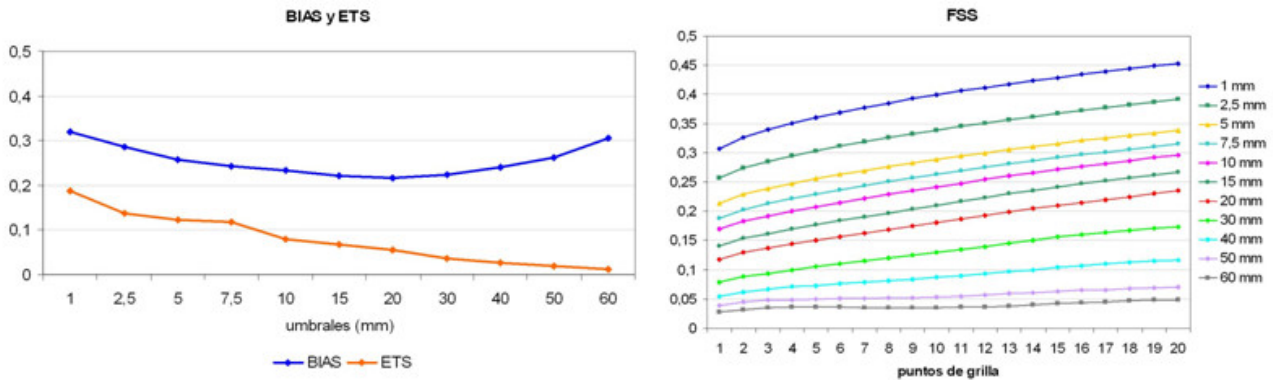


Figura 2: Valores de ETS y BIAS score (panel izquierdo) y FSS (panel derecho) para las dos temporadas de verano calculados en el dominio G1 de la Figura 1.

para el análisis de la calidad de los pronósticos: dic2010-feb2011 y dic2011-feb2012. Las estadísticas fueron calculadas considerando la precipitación acumulada en 12 horas para cada día. En total fueron evaluados para ambos periodos de verano, 164 días.

Se puede ver en la Figura 2 (a) los valores de ETS y BIAS score en función de los distintos umbrales de precipitación. El BIAS score, nos muestra que el modelo tiende a subestimar el área de precipitación en todos los umbrales, siendo el umbral de 20 mm en el que más se aleja del comportamiento ideal. Los valores de FAR (no se muestra figura) hallados muestran que para los umbrales más bajos el modelo alcanza valores inferiores a 0.4 mientras que los de POD tienen un comportamiento esperado opuesto (Roebber, 2009) decreciendo a medida que aumentan los umbrales con un máximo en 0.2 para el umbral de 1 mm. Asimismo, evaluando la coincidencia espacial entre el campo de precipitación observado y el pronosticado, vemos que el ETS nos muestra los máximos valores cercanos a los umbrales más pequeños alcanzando el valor de 0.2 para el umbral de 1 mm y decrece hacia umbrales más altos. Si bien estos valores quedan alejados del comportamiento óptimo de los modelos se asemejan a los hallados por Dillon (2012 y otros trabajos citados en el mismo) donde encuentra valores de hasta 0.3 para eventos de precipitación acumulada a 12 horas pronosticados con el modelo WRF-ARW (Advanced Research

WRF) de 8 km de resolución.

En el caso particular de la precipitación, dada su alta variabilidad espacial, la verificación puntual de su ocurrencia puede no ser una medida representativa para calificar el desempeño de un modelo. En este sentido, un patrón de precipitación que fue bien pronosticado en su forma y magnitud pero que está desplazado respecto del campo observado se considerará un desacierto si tenemos en cuenta los estadísticos tradicionales. Para contemplar estas situaciones se calculó el índice FSS que nos brinda una idea de cómo varía el desempeño del modelo en función a la escala espacial que se está considerando. Resulta de mucha utilidad para conocer si existe alguna resolución espacial a la cual el modelo adquiera un mejor desempeño o en qué escalas los pronósticos son lo suficientemente precisos. La Figura 2 (b) muestra los valores del índice FSS

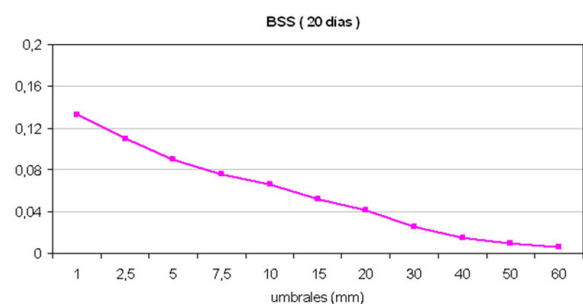


Figura 3: Índice BSS para todo el periodo de estudio con 20 días de entrenamiento.

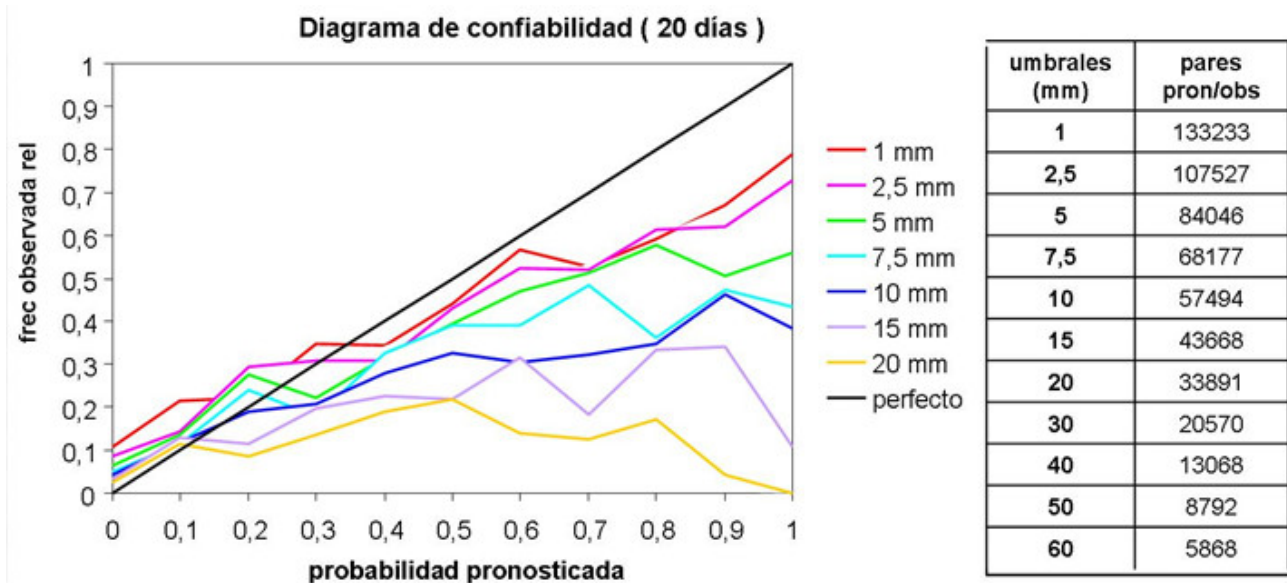


Figura 4: Diagrama de confiabilidad con periodo de entrenamiento de 20 días y tabla de frecuencias de pares de pronóstico/observación en el período de estudio utilizados para el cálculo de las probabilidades.

en función al tamaño de la vecindad (1 punto de grilla = 8 km de lado). Se puede observar que aumentan a medida que consideramos una vecindad más grande y por otro lado, son menores a medida que aumenta el umbral. Asimismo, para el umbral de 1 mm varían de 0.3 hasta 0.45 para la vecindad más grande. Estos resultados se asemejan con los hallados por Dillon (2012) para la región y en donde se muestra un comportamiento similar aplicado a pronósticos de precipitación en alta resolución espacial.

En el caso del proceso de verificación del pronóstico probabilístico, se puede ver en la Figura 3 los valores de BSS para todo el periodo de estudio. Se utilizaron 20 días de entrenamiento para la calibración de los PP al igual que lo proponen Ruiz et al (2011), Aldeco (2011) y Cardazzo et al (2010) aplicados en pronósticos por ensambles para precipitaciones acumuladas en 24 horas. Se puede ver que el índice alcanza los valores más altos para los umbrales más bajos manteniéndose por debajo de 0.16 y disminuyendo a medida que aumenta el valor del umbral. Estos resultados concuerdan con los hallados por Cardazzo et al (2010) para los PP de precipitación no calibrados durante la época de

verano en donde los máximos se mantienen por debajo de 0.2. Los valores hallados en la Figura 3 probablemente se deban a la variabilidad en la ocurrencia de las precipitaciones durante la temporada estival. Durante el verano, predominan las precipitaciones de origen convectivo las cuales están asociadas a una menor predictabilidad lo cual impacta negativamente en la calidad de los pronósticos de lluvia.

Finalmente, la Figura 4 muestra un diagrama de confiabilidad el cual relaciona, para cada uno de los umbrales, la probabilidad pronosticada y la frecuencia observada para todos los pares de pronóstico/observación analizados. La diagonal representa la relación que resultaría si un sistema de pronóstico fuese perfectamente confiable. Dado cierto umbral, la cantidad de pares está dada por la cantidad de puntos de grilla en donde se observó y pronosticó lluvia por encima de ese umbral para todo el periodo de estudio, siendo esta misma cantidad la que se utilizará a la hora de calcular la probabilidad de que se pronostique lluvia superior a ese umbral. En la Figura 4 se puede ver un comportamiento similar para todas las curvas a medida que aumenta el valor del umbral. En general, se puede observar

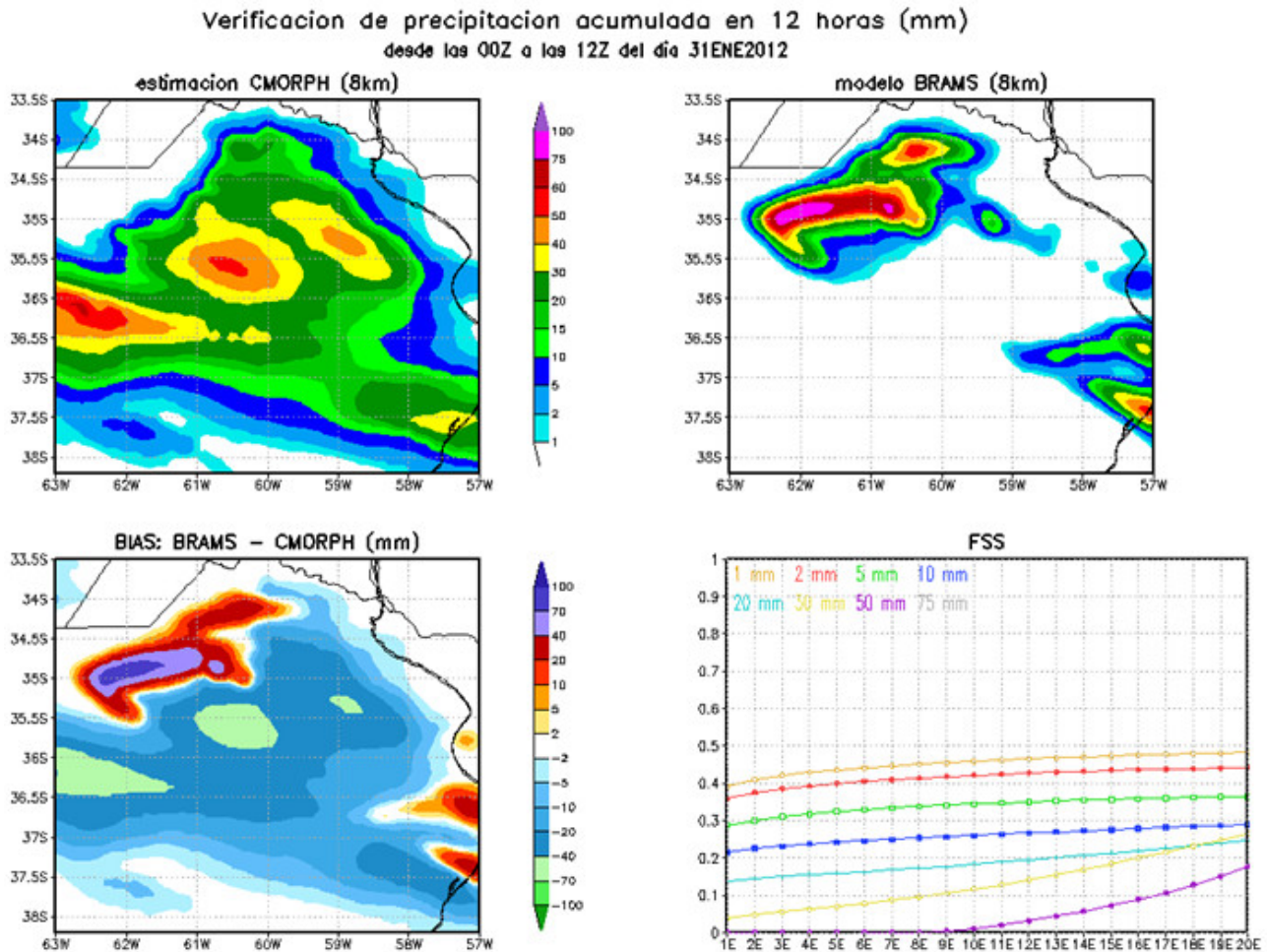


Figura 5: Campos de precipitación acumulada entre las 00 y las 12 UTC del día 31 de enero de 2012: (a) estimada con CMORPH y (b) pronosticada con el modelo BRAMS. (c) diferencia entre los valores pronosticados menos los observados (en mm) y (d) FSS correspondiente a ese día.

para umbrales de 1 y 2.5 mm que la probabilidad pronosticada es similar a la frecuencia observada aunque para probabilidades de hasta un 35% aproximadamente existe una leve subestimación mientras que hacia probabilidades mayores son sobreestimadas. Para umbrales más altos el comportamiento del modelo se aleja del perfectamente confiable tendiendo a la sobreestimación. A modo de completar la información se presenta en la tabla de la Figura 4 la cantidad de pares pronóstico/observación utilizados para el cálculo de estas curvas.

Cabe señalar, que esta evaluación también se realizó utilizando 40 días de entrenamiento (no se muestra) pero no se obtuvieron resultados que

indiquen una mejora significativa en la calidad de los pronósticos. Como se mencionó anteriormente, la evaluación en el desempeño del modelo está sujeta al periodo de estudio considerado. En este sentido, si se considerara un periodo mayor a 6 meses, incluyendo los meses de invierno, podrían obtenerse resultados más favorables. De igual manera debe considerarse la calidad del campo inicial y las condiciones de borde provenientes del modelo ETA.

No obstante, los valores hasta aquí hallados deben tomarse con cierta cautela dado que los datos estimados con la técnica CMORPH tienen errores sistemáticos tanto en magnitud como en la localización de la precipitación (Ruiz, 2009;

Hobouchian et al, 2012) que pueden propagarse a los errores en el cálculo de los índices. En particular, los autores mencionados encuentran en el análisis de la precipitación acumulada a 24 horas una sobrestimación de la precipitación en la región de interés. Asimismo, Ruiz (2009) analiza diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones CMORPH para la estación calida 2002-2003 encontrando que existen errores sistemáticos que tienden a sobrestimar las magnitudes en los valores acumulados de precipitación. Por lo tanto, en el futuro, para evaluar la sensibilidad de estos índices, deberían considerarse regiones que presenten alta densidad espacio-temporal de información de superficie proveniente de estaciones automáticas o pluviómetros. De igual manera, se hace necesaria la utilización de una combinación de observaciones consistentes de estaciones de superficie y estimaciones satelitales, con el fin de calibrar estas últimas mediante las primeras.

3.2. Caso 31 de enero de 2012

En esta sección se presentan algunos de los productos generados disponibles operativamente para un caso de estudio particular.

Una de las herramientas que se generan diariamente en forma operativa y experimental es una verificación de los campos pronosticados de precipitación acumulados a 12 horas. En la Figura 5 se pueden ver para este día los campos de precipitación acumulada entre las 00 y las 12UTC estimados con CMORPH y los pronosticados con el BRAMS, el campo de diferencia entre el la precipitación pronosticada y observada y las curvas de FSS. En este caso en particular, se observó una zona de precipitación con 3 máximos que superan los 40 mm sobre el centro-norte del dominio. Mientras que el modelo pronosticó 2 áreas de precipitación, una sobre el borde este del dominio y otra en el centro-norte la cual presenta 2 máximos superiores a 40 mm. Asimismo, se destaca un centro con valores mayores a 75 mm centrado en 35°S-62°O. El índice FSS para este día, si bien no es estrictamente calculado para los umbrales antes mencionados, presenta

un comportamiento similar respecto al calculado para todo el periodo de estudio.

Se aplica el esquema de verificación espacial CRA basado en la definición de entidades como complemento a lo anteriormente analizado. Tal como se describió en la metodología, las entidades quedan definidas a partir de un cierto umbral de precipitación, que en nuestro caso es la isolínea de 20 mm. La Figura 6 presenta las entidades detectadas por la técnica en el campo observado y en el pronosticado, un diagrama de dispersión con la distribución de los puntos de grilla asociados a las entidades y algunos valores estadísticos. Asimismo, una vez detectadas las entidades se calcula el vector desplazamiento que une los centros de ambas. Si bien el modelo logra pronosticar los patrones de precipitación se puede ver en el caso de la entidad más grande que el máximo pronosticado se encuentra 0.62° más hacia el oeste y 0.79° más hacia el norte que el observado. Una de las ventajas de esta técnica es que se pueden obtener cuantitativamente los errores asociados a la correspondencia entre los patrones de precipitación pronosticados respecto de los observados descomponiéndolos en distintos factores: desplazamiento, volumen y patrón. En este sentido, más del 43 % del error total computado se asocia al factor desplazamiento mientras que los errores asociados al volumen de precipitación y variabilidad en el patrón espacial se reparten en aproximadamente un 30 %. El tamaño del dominio del BRAMS representa para esta técnica un desafío debido a que la determinación del desplazamiento de las entidades se basa en la búsqueda de la correspondencia de las entidades dentro de un área cuadrada de menor dimensión que la del dominio del modelo. Se ha visto en muchos casos del periodo de estudio que los sistemas precipitantes son más grandes que el tamaño del dominio por lo que frecuentemente las entidades pronosticadas quedan sobre los bordes lo cual representa una limitación para la técnica. En particular, aquellas entidades que quedan con más del 40 % de su área por fuera de los límites del dominio se ven afectadas en cuanto a que no se puede definir el área de búsqueda y no se puede efectuar un

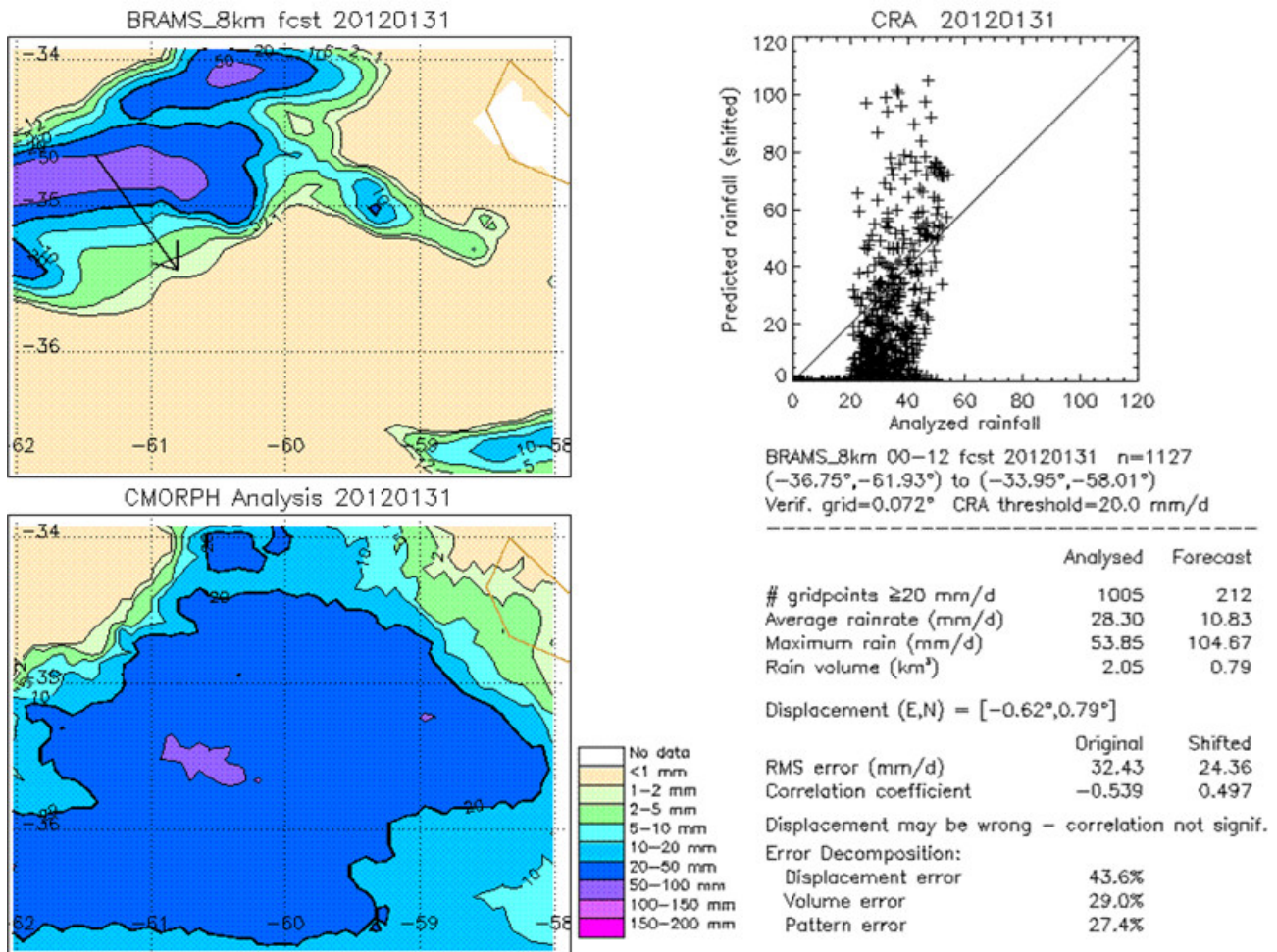


Figura 6: Entidad detectada, vector desplazamiento (flecha negra) y diagrama de dispersión de los datos observados frente a los pronosticados de la entidad.

desplazamiento hacia la entidad pronosticada.

La Figura 7 muestra los resultados del cálculo del pronóstico probabilístico. Se observan los campos de probabilidad pronosticada para distintos umbrales, por ejemplo, para el caso de un umbral de 20 mm estos campos muestran la probabilidad de que la precipitación pronosticada supere dicho umbral. Asimismo, se destacan en contornos negros las isolíneas de la precipitación observada para el mismo umbral. Se utilizaron 20 días de entrenamiento como periodo para la calibración. Se puede ver que para los umbrales de 1, 2.5 y 5 mm las áreas con probabilidades superiores al 80 % quedan mayormente contenidas dentro de las áreas de precipitación observada para esos umbrales lo que sugiere una medida

en el grado de acierto del pronóstico. Asimismo, a medida que consideramos umbrales más grandes, las probabilidades de pronosticar precipitación por encima de cada umbral disminuye. En el caso del umbral más alto vemos que existe sólo una probabilidad de entre el 10 y el 20 % de precipitación pronosticada superior a 40 mm. Como se discutió anteriormente, el aporte del pronóstico probabilístico es que introduce información acerca de la incertidumbre asociada al modelo. No sólo se brinda la información acerca de la ocurrencia/no-ocurrencia de lluvia sino que indica la probabilidad con la que puede superar cierto umbral.

Por último, se analizará la estimación de precipitación acumulada entre las 00 y las 12UTC

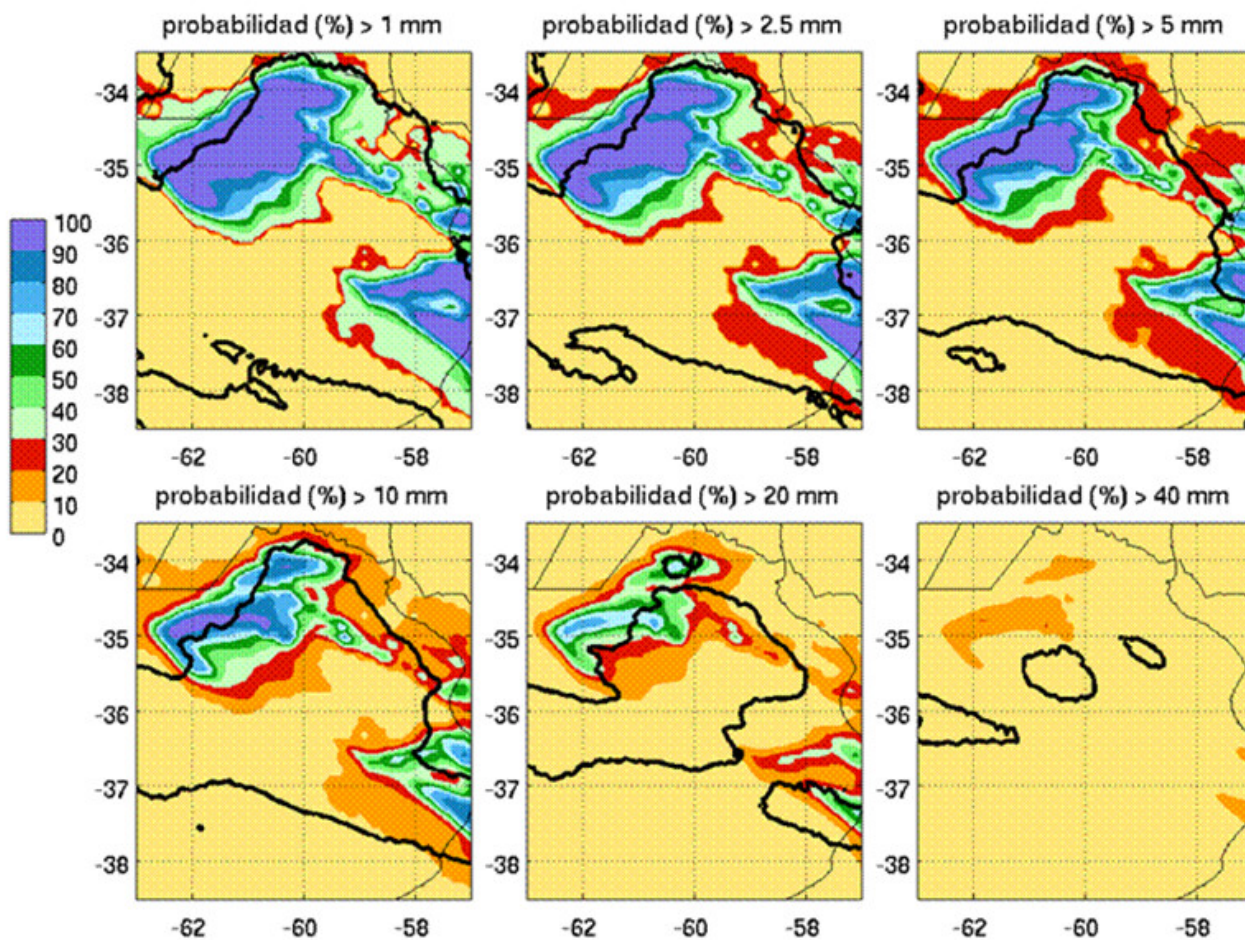


Figura 7: Campos de probabilidad de precipitación pronosticada para el día 31 de enero de 2012. En contornos negros se marca la isólinea de precipitación estimada por CMORPH correspondiente a cada umbral.

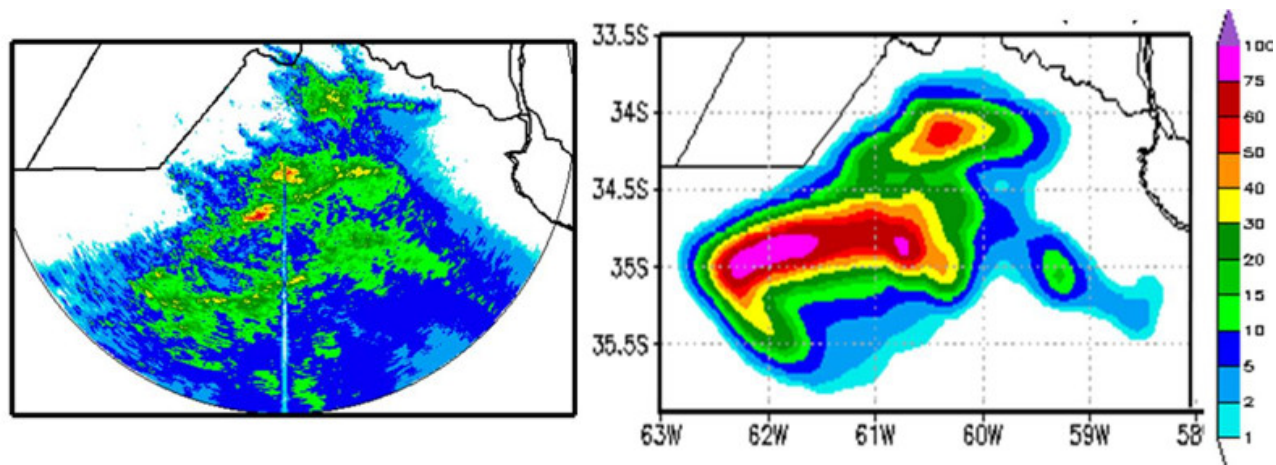


Figura 8: Panel izquierdo: Estimación de precipitación acumulada (mm) entre las 00 y las 12UTC el día 31 de enero de 2012 pertenecientes al radar de Pergamino (INTA-SMN). Panel derecho: campo de precipitación pronosticada con el BRAMS para el mismo periodo.

del día 31 de enero de 2012 derivada a partir de los datos del radar de Pergamino (INTA-SMN) en el radio de cobertura de 240 km, con una resolución de 4 km, que se muestran en la Figura 8 (panel izquierdo). En el panel derecho se muestra el campo de precipitación pronosticado correspondiente al área de cobertura del radar de modo de que ambos campos de precipitación sean comparables. Se observa que el máximo de precipitación pronosticado quedó ubicado levemente hacia el sur en comparación con el máximo estimado con el radar. Si bien en ambos campos logran distinguirse 2 zonas de máximos, los valores observados sólo alcanzan máximos de hasta 60 mm mientras que el modelo las pronosticó por encima de los 75 mm lo que denota una sobreestimación tal como se halló anteriormente con los datos CMORPH. En este sentido, en el caso particular del máximo pronosticado ubicado hacia el sudoeste, puede existir un efecto de atenuación en la señal del radar que se traduciría en una subestimación de los valores de precipitación. Este tipo de comparación, aún requiere ajustes en los que se está trabajando, por ese motivo aún no se realiza en tiempo real.

En particular, para este caso el área cubierta por el radar de Ezeiza no logró captar la totalidad de la estructura de precipitación y los campos de reflectividad quedan atenuados porque se sitúan sobre el borde oeste por lo que mostrar dichos resultados no aportaría información a la discusión

4. DISCUSIÓN Y FUTURA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

En este trabajo se presentan productos generados a partir del modelo BRAMS en alta resolución operativo en el SMN en forma experimental y se presenta una primera evaluación de los resultados del mismo. Con dicho modelo se generan pronósticos determinísticos de precipitación y a partir de ellos se elabora un pronóstico probabilístico que proporciona información sobre la incertidumbre de los pronósticos determinísticos. Además se realiza una verificación operativa de ambos pronósticos.

Con el fin de realizar una primera evaluación se emplearon 2 temporadas de verano: dic2010-feb2011 y dic2011-feb2012 de pronósticos experimentales en la resolución de 8 km del BRAMS. Los estadísticos calculados ETS, BIAS score, POD y FAR representativos de los 6 meses para diferentes umbrales, muestran valores similares a los hallados anteriormente por otros autores como, por ejemplo, Dillon (2012 y otros trabajos citados en el mismo) para diversos modelos de mesoescala. Asimismo, se calculó el índice FSS como estadístico de verificación difusa el cual aporta información acerca de la resolución espacial a la cual el modelo adquiere un mejor desempeño. Por otro lado, el desempeño de los pronósticos probabilísticos muestra resultados similares a los encontrados por otros autores para la temporada de verano. Los resultados muestran la sensibilidad según la cantidad de días que se utilizan para la calibración así como un mejor desempeño para los umbrales pequeños.

Esta primera evaluación del pronóstico experimental permitió identificar algunas limitaciones del mismo. Los resultados obtenidos a través de las verificaciones realizadas ponen de manifiesto la necesidad de extender el dominio de integración del modelo debido a la relación entre el tamaño de los sistemas que se pretenden detectar y el tamaño del dominio. En algunos casos no se logra ver la evolución completa de los sistemas de tormentas debido a la limitada extensión del dominio empleado. Si bien la limitación del dominio está relacionada con la capacidad de cómputo, se plantea la posibilidad de considerar otro tipo de anidado. Por otro lado, dado que el modelo de pronóstico WRF está siendo ampliamente utilizado en la región y por la comunidad científica en general lo que repercute en avances en el desarrollo del mismo, se plantea la posibilidad de realizar los pronósticos en alta resolución utilizando dicho modelo. La determinación del tamaño del dominio, resolución y el tipo de configuración empleada se presentan como un desafío en el que hay que avanzar.

Cabe destacar que en la región es el primer siste-

ma de pronóstico numérico operativo con resoluciones de 8 y 2 km que resuelve la convección en forma explícita. Además es importante señalar la dificultad adicional que representa para la validación y verificación de los pronósticos la falta de fuentes de información en una escala acorde a la del pronóstico. Dada esta carencia, se opta por utilizar las estimaciones de precipitación CMORPH como fuente para las observaciones, pero es importante tener en cuenta sus limitaciones. En este sentido se plantea la necesidad de avanzar en el desarrollo e implementación de técnicas de calibración de dichas estimaciones. Es importante mencionar, la existencia en la actualidad dentro del área del dominio del modelo, de dos disdrómetros uno en funcionamiento y otro en proceso de instalación, ambos en el área de cobertura del radar de Ezeiza. Se espera que con la información brindada por dichos equipos se puedan ajustar las estimaciones de precipitación a partir de datos de radar. En el futuro uno de los objetivos propuestos es realizar verificaciones operativas incorporando la información provista por los radares.

Agradecimientos: Los proyectos de investigación que financiaron este trabajo son: PIDDEF 47/2010, ANPCyT PICT 2008-1603, PICT 2007-00355 y PICT 2010-1986 UBACyT 2008-2010 X159, UBACyT 2011-2014 W 742 y CONICET PIP 2010-2012 N° 11220090100850.

REFERENCIAS

- Aldeco, L. S., 2011: Aplicación de la técnica de análogos a la generación de pronósticos probabilísticos de precipitación sobre algunas estaciones de la Argentina. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Brier, Glenn W., 1950: "Verification of Forecasts Expressed in Terms of Probability," *Mon Wea Rev*, 78, No. I, pp. 1-3.
- Cardazzo, S., Ruiz J. y Saulo C., 2010. Calibración de los pronósticos probabilísticos de precipitación derivados de un ensamble multi-modelo utilizando diferentes metodologías. *Meteorológica*, Vol 35 N°2, 41-51.
- Dillon, M. E., 2012: Desempeño del pronóstico de precipitación de modelos de alta resolución en un área limitada: análisis de la estación de verano 2010-2011. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Ebert, E, and W. Gallus Jr., 2009: Toward better understanding of the contiguous rain area (CRA) method for spatial forecast verification. *Wea. Forecasting*, 24, 1401-1415.
- Ebert, E.E., 2008: Fuzzy verification of high resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. *Meteorol. Appl.*, 15, 51-64.
- Ebert, E.E. y J.L. McBride, 2000: Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *J. Hydrology*, 239, 179-202.
- Epstein, E. S., 1969. Stochastic-dynamic prediction. *Tellus*, 21, 739-759.
- Fowle, M.A. y P.J. Roebber, 2003: Short-range (0-48 h) numerical prediction of convective occurrence, mode, and location. *Wea. Forecasting*, 18, 782-794.
- Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Silva Dias, M. A. F.; Chatfield, R.; Silva Dias, P.; Artaxo, P.; Andreae, M. O.; Grell, G.; Rodrigues, L. F.; Fazenda, A. y Panetta, J., 2009: The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 1: Model description and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 9, p. 2843-2861.
- Gallus, W. A., y M. Segal, 2004: Does Increased Predicted Warm-Season Rainfall Indicate Enhanced Likelihood of Rain Occurrence?. *Weather and Forecasting*, 19, 1127-1135.
- García Skabar, Y., L. Vidal, P. Salio y M. Nicolini, 2011: Experimental high-resolution forecast in a region of Argentina. Working group in Numerical Experimentation (WGNE) Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (Blue book), 5, Pag 09-10. Online: http://www.wmo.int/pages/about/sec/rescrosscut/resdept_wgne.html
- Goodman S.J. y D. Cecil, 2002: The most extreme thunderstorms on earth. 17th International lightning Detection Conference. Tucson,

- AZ. 6 págs.
- Hamill T., 1999. Hypothesis Tests for Evaluating Numerical Precipitation Forecasts. *Weather and Forecasting*, 14, 155-167.
- Hamill, T. y S. J. Colucci, 1998: Evaluation of Eta-RSME Ensemble Probabilistic Precipitation Forecast. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 711-724.
- Hamill, T., y S. J. Colucci, 1997: Verification of Eta-RSM Short-Range Ensemble Forecast, *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1312-1327.
- Houbouchian, P, P. Salio, D. Vila y Y. Garcia Skabar, 2012: Comparación de productos de precipitación de alta resolución sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial. *Congremet XI*, Mendoza, Argentina. 28 de mayo al 1 de junio de 2012.
- Joyce R.J., Janowiak J.E., Arkin P.A. y Xie P., 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Of Hydromet.*, Vol 5, 487-503.
- Kain J.S., Weiss S.J., Bright D.R., Baldwin M.E., Levit J.J., Carbin G.W., Schwartz C.S., Weisman M.L., Droegemeier K.K., Weber D.B. y Thomas K.W., 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Weather and Forecasting.*, 23, 931-952.
- Kalnay, E., 2003: Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, UK, 341 pp.
- Lean, H. W., P. A. Clark, M. Dixon, N. M. Roberts, A. Fitch, R. Forbes, y C. Halliwell, 2008: Characteristics of High-Resolution Versions of the Met Office Unified Model for Forecasting Convection over the United Kingdom. *Mon. Wea. Rev.* Vol 136, Issue 9, 3408-3424.
- Matsudo, C. M., Y. García Skabar, L. Ferreira y P. Salio, 2012: Aplicación de una técnica espacial de verificación en pronósticos de precipitación en alta resolución. *Congremet XI*, Mendoza, Argentina. 28 de mayo al 1 de junio de 2012.
- Meyers, M. P., Walko R. L., Harrington J. Y. y Cotton W. R., 1997. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II. The two-moment scheme. *Atmos. Res.*, 45, 3-39.
- Murphy, A.H., 1973: A new vector partition of the probability score. *J. Appl. Meteor.*, 12, 595-600.
- Roberts N.M. y Lean H.W., 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, Vol 136, 78-97.
- Roebber P.J., 2009. NOTES AND CORRESPONDENCE. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea. And For.*, Vol 24, 601-608.
- Ruiz, J. and C. Saulo, 2011. How sensitive are probabilistic precipitation forecasts to the choice of calibration algorithms and the ensemble generation method? Part I: Sensitivity to calibration methods. *Meteorological Applications*, 1-12, DOI:10.1002/met.286.
- Ruiz, J., C. Saulo y E. Kalnay, 2009: Comparison of methods to generate probabilistic quantitative precipitation forecasts over South America, *Wea. Forecasting*, 24, 319-336.
- Ruiz J. 2009. CMORPH precipitation estimates calibration and verification over South America. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24: 474-488 (in Spanish).
- Salio, P., M. Nicolini, y E. J. Zipser, 2007: Mesoscale Convective Systems Over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1290-1309.
- Saulo, C., S. Cardazzo, J. Ruiz, C. Campetella y A. Rolla, 2008. El sistema de pronóstico experimental del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, *Meteorológica*, vol. 33, 83-97.
- Stensrud, D. y N. Yussouf, 2007: Reliable Probabilistic Quantitative Precipitation Forecast from a Short-Range Ensemble Forecasting System. *Weather and Forecasting*, Vol 22, 3-17.
- Suaya M. y R. Valdivieso, 2009: Modelo ETA SMN 2003-2008: usos, experiencias y resultados. *CONGREGMET X/CLIMET XIII*, 5-9/10/2009, Buenos Aires, Argentina. Versión

en CD.13pp.

Vidal L., 2009: Caracterización de los sistemas convectivos sobre el sudeste de Sudamérica a partir de observaciones TRMM con énfasis en la convección extrema. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina.

Weisman M.L., Davis C., Wang W. Manning K.W. y Klemp J.B., 2008. Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Wea. And For.*, Vol 23, 407-437.

Zipser E.J., Cecil, C. Liu, S. W. Nesbitt y D.P. Yorti, 2006: Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bull. Amer. Soc.*, Vol 87, N°8, 1057-1071.