

Evaluación preliminar de un sistema de precipitación a muy corto plazo basado en la extrapolación de datos sintéticos de radar

Aldana Arruti¹⁻²⁻⁵, Juan Ruiz²⁻³⁻⁴⁻⁵, Paola Salio²⁻³⁻⁴⁻⁵, Yanina García Skabar¹⁻⁴⁻⁵

 Departamento de Investigación y Desarrollo, Servicio Meteorológico Nacional. 2- Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. 3- Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. 4- UMI- Instituto Franco Argentino sobre Estudios del Clima y sus Impactos.
 5- CONICET.

E-mail: aarruti@smn.gov.ar

RESUMEN

En Argentina, existen diversas regiones con condiciones meteorológicas capaces de generar eventos meteorológicos de alto impacto. Dichos eventos pueden generar episodios de precipitación muy intensa dando lugar a inundaciones, granizo o vientos extremos, causando enormes perjuicios para la población. Por ello, se busca avanzar en la mejora del pronóstico a muy corto plazo (0-6 horas) de este tipo de eventos.

En el presente trabajo se propone desarrollar y evaluar un modelo de pronóstico a muy corto plazo basado en técnicas de extrapolación del campo de reflectividad sintética similar a la obtenida por un radar meteorológico. Partiendo de la hipótesis de que los sistemas precipitantes en el muy corto plazo pueden describirse a partir de su movimiento observado en imágenes previas sucesivas, se implementó un método advectivo semi-lagrangiano de extrapolación del campo de reflectividad. En este trabajo se comparan diferentes alternativas para obtener los vectores desplazamiento que se utilizan para extrapolar el campo de reflectividad. Así también, se estudia la dependencia de la calidad del pronóstico de reflectividad a distintas medidas de similitud utilizadas en el cálculo del campo de movimiento.

INTRODUCCIÓN

Algunas aplicaciones hidrológicas requieren resolver pronósticos cuantitativos de precipitación en espacio y tiempo que permitan a los modelos hidrológicos producir pronósticos puntuales para las inundaciones repentinas o el caudal diario de los ríos (Mecklenburg, 2000). En este contexto, las técnicas de extrapolación de datos de reflectividad y/o precipitación son de suma importancia como herramienta para el seguimiento y pronóstico a muy corto plazo de sistemas precipitantes de pequeña escala espacio-temporal (del orden de kilómetros y minutos, respectivamente). Dichas técnicas se basan en la utilización de datos de radar y/o satélite para realizar una descripción de la ubicación y desplazamiento de los sistemas precipitantes. Dicho desplazamiento es luego utilizado para realizar un pronóstico por extrapolación. Las técnicas de extrapolación y seguimiento de objetos (algoritmos de centroide), en los que cada sistema precipitante es tratado como una unidad individual, como por ejemplo TITAN, de sus siglas en inglés Thunderstorm Identification, Tracking,

Analysis and Nowcasting (Dixon y Wiener, 1993). Por otro lados se encuentran las técnicas enfocadas en la advección de un campo escalar que puede ser reflectividad, tasa de precipitación u otra cantidad mediante un campo de desplazamiento calculado a partir de las últimas imágenes de radar y/o satélite disponibles. Existen a su vez diferentes técnicas para derivar el campo de desplazamientos.

Desde 1976 se ha demostrado la factibilidad de un sistema de pronóstico a muy corto plazo operando en tiempo real utilizando el radar de McGill en Montreal Canadá (Bellon y Austin, 1978) y a partir de allí, numerosas técnicas afines han sido presentadas. Li et al. (1995) obtuvo el campo de desplazamiento aplicando la técnica de correlación cruzada. Germann y Zawadzki (2002) presentaron el método MAPLE (McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation) basado en la determinación del campo desplazamiento mediante el método VET (variational echo motion, Laroche et al., 1994) y la utilización de un esquema advectivo semi-Lagrangiano (Robert 1981). Seed (2003) propuso el modelo SPROG, el cual tiene la habilidad de filtrar las escalas menos predecibles a medida que el tiempo de pronóstico aumenta.

En el presente trabajo se utiliza la técnica Tracking Radar Echoes by Correlation (TREC), propuesta por Rinehart and Garvey (1978). Esta última consiste en dividir los campos sucesivos de reflectividad en igual número de bloques y cada bloque del primer tiempo es comparado con todos los posibles bloques del segundo tiempo, así la combinación con la mayor correlación es seleccionada para la determinación del vector desplazamiento. Por lo tanto, el conjunto de vectores obtenidos para cada par de bloques conforman el campo de desplazamiento. Luego, los vectores desplazamiento obtenidos con la técnica TREC se combinan con un método advectivo semi-lagrangiano con el fin de extrapolar en tiempo la evolución de los sistemas precipitantes.

El objetivo de este trabajo está centrado en el desarrollo y evaluación de un modelo de pronóstico a muy corto plazo basado en técnicas de extrapolación de reflectividad. A su vez, tiene los siguientes objetivos específicos: 1) Implementación de un método de extrapolación del campo de reflectividad, basado en la determinación de los vectores desplazamiento entre campos sucesivos y la utilización de un esquema advectivo semi-lagrangiano. 2) Análisis de sensibilidad del pronóstico de reflectividad a los distintos parámetros empleados para el cálculo de los vectores desplazamiento.

DATOS Y METODOLOGÍA

Datos

Los datos utilizados corresponden a campos sintéticos de reflectividad a 2km generados con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). La elección de este tipo de datos radica en que cuentan con una serie de ventajas respecto a la utilización de datos de reflectividad brindados por los radares meteorológicos. En primer lugar, los datos sintéticos de reflectividad se encuentran libres de ecos no meteorológicos, atenuaciones de la señal y una retícula de irregular resolución, por lo que no es necesario que sean sometidos

a un estricto control de calidad y correcciones por atenuación. En segundo lugar, poseen una mayor resolución espacio-temporal que los datos de radar meteorológico que actualmente se dispone en la Argentina. Además, dado que se buscó la prueba de distintas técnicas de extrapolación, se decidió trabajar con este tipo de datos generando una menor fuente de error en las observaciones.

La resolución de los datos sintéticos de reflectividad corresponde a una resolución espacial de 2km y temporal de 5 minutos. El período simulado comprendió desde el 22 de enero de 2014 a las 15 UTC hasta las 22 UTC y abarcó una zona equivalente a tres radares superpuestos. Durante este período se produjo la iniciación, desarrollo y evolución de un sistema precipitante que produjo precipitaciones intensas (Figura 1).



Figura 1.- Secuencia de reflectividad sintética a 2 km correspondiente al día 22 de enero de 2014 entre las 16UTC y 22UTC.

Metodología

El método de extrapolación implementado correspondió a un algoritmo advectivo y constó de 3 etapas:

- 1. Determinación de los vectores desplazamiento;
- 2. Post-procesamiento de los vectores desplazamiento, lo cual comprendió un control de calidad y suavizado del campo de movimiento;

3. Advección del campo de reflectividad ane di ante sosti de los vectores desplazamiento previamente calculados para la obtención de un pronóstico.

Para su desarrollo se emplearon los lenguajes Python y Fortran. Se utilizó la interfaz de Python con Fortran mediante el compilador f2py. Dicha interfaz, permite resolver de manera eficiente aquellas partes del algoritmo que tienen asociado un mayor costo computacional (por ejemplo el cálculo de los vectores desplazamiento). El código fue implementado en forma paralelizada usando OpenMP corriendo en un servidor con 8 procesadores y 8 GB de RAM.

En el presente estudio, la determinación de los vectores desplazamiento se realizó a partir de la metodología propuesta por Rinehart and Garvey (1978), mediante la técnica TREC. A su vez, se calculó el vector desplazamiento para cada punto de retícula, por ello se definió un área o bloque alrededor de cada uno de éstos. Así se tuvieron (nx x ny) bloques superpuestos por cada campo de reflectividad, donde nx y ny representan las dimensiones de la matriz en la orientación zonal y meridional respectivamente. A su vez, para definir los bloques correspondientes a los puntos de retícula del borde o cercanos a éste, se extendió el dominio original en forma artificial en todas las direcciones. Los nuevos puntos de retícula definidos se completaron con ceros.

En segunda instancia, cada bloque del campo de reflectividad correspondiente al primer tiempo fue comparado con los bloques del segundo tiempo que se encontraban a una distancia menor a un determinado umbral, fijado en función de las velocidades a las que típicamente se desplazan los sistemas precipitantes en nuestra región. Asimismo, dicha comparación se realizó solo para aquellos bloques que superaban un 4% del área con reflectividad mayor a cero, con el fin de reducir el costo computacional y el tiempo involucrado en los cálculos.

El tamaño de los bloques que se utilizaron para el cálculo es un parámetro que puede tener un impacto importante en el cálculo de los vectores desplazamiento y por ende en el pronóstico. Por ello, se debió tomar una decisión acerca de las dimensiones del área de cada bloque. En el presente trabajo se evaluó este parámetro y se tomaron 10 tamaños que van desde una pequeña porción del dominio (40km x 40km, 21 x 21 puntos de retícula) representativo de las características de pequeña escala, a casi la totalidad del dominio (400kmx400km, 201 x 201 puntos de retícula), representativo de las características globales de movimiento del sistema precipitante. La Tabla 1 muestra todos los tamaños de bloque considerados.

Tamaño de los bloques (puntos de retícula)	Tamaño de los bloques (km ²)
21x21	40x40
41x41	80x80
61x61	120x120
81x81	200x200

Tabla 1.- Tamaño de los bloques considerados para el cálculo de los campo de vectores desplazamiento.

121x121	240x240
141x141	280x280
161x161	320x320
181x181	360x360
201x201	400x400

Otro aspecto importante de la técnica y que puede tener un impacto sobre el cálculo de los vectores desplazamiento, es la medida de similitud que se emplea para comparar los bloques correspondientes a diferentes tiempos. En este trabajo, se utilizaron dos medidas de similitud para la comparación entre los bloques de reflectividad de los campos sucesivos. Una de ellas emplea el coeficiente de correlación, definido como:

$$CC_{\delta i,\delta j}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{\sum\{[\mathbf{R}_{(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{t}_{0}-\Delta t)} - \overline{\mathbf{R}_{(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{t}_{0}-\Delta t)}}][\mathbf{R}_{(\mathbf{x}-\delta i,\mathbf{y}-\delta j,\mathbf{t}_{0})} - \overline{\mathbf{R}_{(\mathbf{x}-\delta i,\mathbf{y}-\delta j,\mathbf{t}_{0})}}]\}}{\{\sum[\mathbf{R}_{(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{t}_{0}-\Delta t)} - \overline{\mathbf{R}_{(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{t}_{0}-\Delta t)}}]^{2}\sum[\mathbf{R}_{(\mathbf{x}-\delta i,\mathbf{y}-\delta j,\mathbf{t}_{0})} - \overline{\mathbf{R}_{(\mathbf{x}-\delta i,\mathbf{y}-\delta j,\mathbf{t}_{0})}}]^{2}\}^{1/2}}$$
(1)

 $(\operatorname{con} |\delta i| \le \delta i_{\max}, |\delta j| \le \delta j_{\max})$

Donde, x e y son las coordenadas del centro del bloque, δi y δj representan los desplazamientos, los cuales fueron limitados por una distancia máxima $\delta i_{máx}$ y $\delta j_{máx}$ respectivamente. $R_{(x,y,t_0-\Delta t)}$ es la matriz conformada por todos los puntos de retícula del bloque del campo de reflectividad al tiempo $t_0 - \Delta t$, $\overline{R_{(x,y,t_0-\Delta t)}}$ es el valor medio de la matriz previamente mencionada, $R_{(x-\delta i,y-\delta j,t_0)}$ es la matriz conformada por todos los puntos de retícula del bloque del campo en t_0 y $\overline{R_{(x-\delta i,y-\delta j,t_0)}}$ el valor medio de esta última.

Y la otra emplea el error cuadrático medio (ECM):

$$ECM_{\delta i,\delta j}(x,y) = \frac{1}{N} \sum [R_{(x,y,t_0 - \Delta t)} - R_{(x - \delta i,y - \delta j,t_0)}]^2$$
(2)

$$(\operatorname{con} |\delta i| \le \delta i_{\max}, |\delta j| \le \delta j_{\max})$$

Donde, x e y son la posición central del bloque, δi y δj los desplazamientos limitados por una distancia máxima dada por $\delta i_{máx}$ y $\delta j_{máx}$. $R_{(x,y,t_0-\Delta t)}$ es la matriz conformada por todos los puntos de retícula del bloque del campo de reflectividad previo, $R_{(x-\delta i,y-\delta j,t_0)}$ la matriz conformada por todos los puntos de retícula del retícula del bloque del campo de reflectividad actual y N la cantidad total de puntos de retícula en el bloque.

Usualmente, la combinación de bloques que alcanza el máximo valor del coeficiente de correlación o el mínimo error cuadrático medio es seleccionada para la determinación de los vectores desplazamiento (Figura 2).



Figura 2.- Esquema de la técnica TREC para la obtención del vector de desplazamiento de reflectividad (sombreado) entre los tiempos $t_0 - \Delta t$ y t_0 .

En este caso, se realizó un promedio pesado de los desplazamientos alrededor del desplazamiento óptimo, es decir, aquel que presentó la mayor correlación o menor error cuadrático. A su vez, el peso utilizado fue proporcional a la norma utilizada y así se obtuvo un campo de vectores desplazamiento más adecuado.

$$u_{(x,y)} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \,\overline{\delta i} \tag{3}$$

$$\mathbf{v}_{(\mathbf{x},\mathbf{y})} = \frac{\Delta \mathbf{y}}{\Delta \mathbf{t}} \,\overline{\delta}\mathbf{j} \tag{4}$$

con,

$$\overline{\delta}I_{(x,y)} = \frac{\sum \delta i CC_{\delta i,\delta j(x,y)}}{\sum CC_{\delta i,\delta j(x,y)}}$$
(5)

$$\overline{\delta J}_{(\mathbf{x},\mathbf{y})} = \frac{\sum \delta j CC_{\delta i,\delta j(\mathbf{x},\mathbf{y})}}{\sum CC_{\delta i,\delta j(\mathbf{x},\mathbf{y})}}$$
(6)

Donde δi y δj son los desplazamientos alrededor de los desplazamientos óptimos y $CC_{\delta i\delta j(x,y)}$ el coeficiente de correlación previamente definido correspondiente a cada δi y δj . De manera análoga se obtuvieron los desplazamientos medios considerando el ECM.

Asimismo, el intervalo temporal entre las imágenes de reflectividad empleado para el cálculo de los vectores desplazamiento correspondió a un Δ t de 5 y 10 minutos, con un desplazamiento máximo posible de 12 y 24 km respectivamente, resultando en una velocidad máxima de 40 m/s y una resolución de 6.6 y 3.3 m/s respectivamente.

Por otro lado, una de las debilidades del tipo de método empleado es que la estimación de los vectores de desplazamiento suele presentar resultados ruidosos cuando se intentan analizar los detalles de menor escala asociados al desplazamiento y deformación de los sistemas de precipitación (Li et al., 1995). La Figura 3 ilustra las componentes zonal (u) y meridional (v) de los vectores desplazamiento obtenidos, correspondiente

IFRH 2016 a las 18:35 UTC, para 3 bloques de distintas areas 40km 40km, 160km 160km y 320km 320km Así, se pudo observar que para el área de menor tamaño, los vectores desplazamiento presentaron saltos importantes en magnitud y dirección con grandes gradientes de velocidad en áreas reducidas, mientras que a medida que aumentaba el tamaño del bloque considerado, se tuvo un campo de movimiento más suavizado.



Figura 3.- Componentes zonal u (columna izquierda) y meridional v (columna derecha) de los vectores desplazamientos correspondientes a las 18:35 UTC, para 3 tamaños de bloques distintos, 21x21 (primer fila), 81x81 (segunda fila) y 161x161 puntos de retícula (tercer fila).

Por ello, se aplicó un control de calidad de Detección de Extremos al campo de vectores desplazamiento obtenido a partir de la técnica TREC. Dicho control de calidad empleado compara el valor de cada punto de retícula del campo de vectores desplazamiento con la media de los valores correspondientes a un bloque de

61x61 puntos de retícula alrededor. Así, si el resultado de esa comparación excede el umbral de 7 m/s, el punto es eliminado.

Por otro lado, la técnica que se propuso para el cálculo de los vectores desplazamiento produce un campo de movimiento sólo para aquellos puntos de retícula donde se dispone de reflectividad, por ello se completó el campo de movimiento utilizando el valor medio de los vectores desplazamiento. Posteriormente, se realizó un suavizado del campo de movimiento obtenido a partir de la utilización de un filtro gaussiano donde, el valor máximo aparece en el punto de retícula central y disminuye hacia los extremos tanto más rápido cuanto menor sea el parámetro de desviación típica, que en este trabajo es de 40km.

Para la advección del campo de reflectividad a partir de los vectores desplazamiento post-procesados, se utilizó un esquema advectivo semi-Lagrangiano (Robert, 1981) hacia atrás con la suposición de un estado estacionario durante el tiempo de integración, es decir, sin considerar cambios en la intensidad del patrón de reflectividad. En este esquema advectivo hacia atrás, en cada paso de tiempo de pronóstico, se determina la posición de origen de la reflectividad y se realiza una interpolación para determinar el valor de la misma en dicha posición. Así, dada la suposición de un estado estacionario, se tiene el valor de la reflectividad para el tiempo de pronóstico correspondiente. Asimismo, en esta primera implementación de la técnica se consideró un campo de vectores desplazamiento constante durante el tiempo de integración.

$$\widehat{R}_{(x_F, y_F, t_0 + \tau)} = R_{(x_I, y_I, t_0)}$$

$$\tag{7}$$

$$\mathbf{x}_{\mathrm{I}} = \mathbf{x}_{\mathrm{F}} - \mathbf{u}_{(\mathbf{x}_{\mathrm{F}}, \mathbf{y}_{\mathrm{F}})_{\Delta \mathbf{x}}^{\mathrm{T}}}$$
(8)

$$y_{I} = y_{F} - v_{(x_{F}, y_{F})\frac{\tau}{\Delta y}}$$
⁽⁹⁾

Donde, $(x_I, y_I) y (x_F, y_F)$ son las coordenadas de los puntos de retícula correspondientes al tiempo $t_0 y t_0 + \Delta t$ respectivamente, $R_{(x_F, y_F, t_0 + \tau)}$ es el valor de reflectividad pronosticado para el tiempo $t_0 + \Delta t y$ posición (x_F, y_F) , $R_{(x_I, y_I, t_0)}$ el valor de reflectividad en el tiempo t_0 , correspondiente a la inicialización del pronóstico, en la posición (x_I, y_I) . $u_{(x_F, y_F)} y v_{(x_F, y_F)}$ son las componentes del vector desplazamiento, $\Delta x y \Delta y$ las resoluciones del campo y τ intervalo de tiempo de pronóstico.

RESULTADOS

La técnica que se propuso en este trabajo, presenta importantes desafíos en las distintas etapas de vida de los sistemas precipitantes, por este motivo se decidió agrupar los pronósticos en dos etapas, una correspondiente a la iniciación, en donde el sistema presentaba fuertes tasas de crecimiento e intensificación, y otra correspondiente a la madurez, donde dichas tasas eran menores.

La etapa de iniciación comprendió los pronósticos inicializados entre las 16:00, y 17:30 UTC a intervalos de 30 minutos (4 pronósticos en total). En esta etapa se observó una fuerte tasa de crecimiento e intensificación de la reflectividad y un desplazamiento hacia el sudeste del sistema. Mientras que la etapa de madurez

abarcó los pronósticos inicializados entre las 18.00 y 19.50 CTCC inclusive, cada 30 minutos (4 pronósticos en total). En esta última etapa, continuó el desplazamiento hacia el sudeste del sistema, sin embargo las tasas de crecimiento fueron menores. La Figura 4 ilustra el porcentaje del área del dominio con reflectividad mayor a 20 dBz y la tasa de crecimiento de esta área calculada a partir del intervalo temporal de 5 minutos entre las imágenes de reflectividad, en función de las horas. Así se observó una mayor tasa de crecimiento en la etapa de iniciación en relación a la etapa de madurez.



Figura 4.- Porcentaje del área total del dominio con reflectividad mayor a 20 dBz (línea azul) y tasa de crecimiento de dicha área multiplicada por un factor de 100 (línea verde).

Comparación de los pronósticos obtenidos según el tamaño de bloque empleado

En primer lugar se analizó el impacto de calcular los vectores desplazamiento con bloques de diferentes tamaños. A las 16 UTC no se tuvieron vectores desplazamiento para los bloques correspondientes a un área de 121x121, 141x141, 161x161, 181x181 y 201x201 puntos de retícula y a las 16:30 UTC no se tuvieron vectores desplazamiento para el bloque de 201x201 puntos de retícula debido a que no se contaba con un área de reflectividad extensa para el cálculo de los vectores desplazamiento. Por ende, para dichos horarios de inicialización de pronósticos sólo se verificaron los pronósticos utilizando los vectores desplazamiento del tamaño de cada bloque se realizó para todos los bloques en la etapa de madurez, y para los bloques correspondientes a 21x21, 41x41, 61x61, 81x81 y 101x101 puntos de retícula en la etapa de iniciación. Así también, los índices utilizados para esta comparación correspondieron a los vectores desplazamientos estimados utilizando imágenes de reflectividad cada 5 minutos y el ECM como medida de similitud entre bloques.

A su vez, para llevar a cabo la validación se realizo una tabla de contingencia, en la que se clasificaron los datos de cada punto de retícula según 4 categorías. La categoría de acierto (A), corresponde a la reflectividad pseudo-observada y pronosticada por encima de un umbral; sorpresa (S) corresponde a la reflectividad pseudo-observada por encima de un umbral y pronosticada por debajo; falsa alarma (FA) corresponde a la reflectividad pronosticada por encima de un umbral y pseudo-observada por debajo; y correcto negativo (CN) corresponde a la reflectividad pseudo-observada por encima de un umbral y pronosticada por debajo de un umbral. En el caso de un pronóstico perfecto, se producirían únicamente aciertos y correctos negativos. A partir de dicha tabla, se construyó el índice categórico Equitable Threat Score (ETS), que representa la habilidad del pronóstico para representar la reflectividad en un valor superior a un determinado umbral y ubicación correcta. Tiene en cuenta los aciertos, falsas alarmas, sorpresas y además los aciertos por azar. El rango de valores que puede tomar este índice se extiende entre - $\frac{1}{3}$ y 1, siendo el valor de 1 el que corresponde a un pronóstico perfecto y un valor de 0 el que corresponde a un pronóstico que tiene el mismo nivel de acierto que un pronóstico al azar.

$$ETS = \frac{A - A_{azar}}{A + S + FA - A_{azar}}$$
(10)

$$A_{azar} = \frac{(A+S)(A+FA)}{N}$$
(11)

Donde N es la cantidad total de pares pronóstico-observación considerados en el cálculo.

La Figura 5 ilustra la variación del índice ETS para cada tamaño de bloque según el plazo de pronóstico para el umbral de reflectividad de 15 dBz y para las etapas de iniciación y madurez. En la etapa de madurez, para el bloque de menor tamaño (21x21 puntos de retícula), a partir de los 30 minutos de plazo de pronóstico se produjo un apartamiento respecto a los demás bloques, mostrando una menor calidad de pronóstico. Además, el bloque correspondiente a 81x81 puntos de retícula presentó un rendimiento ligeramente mayor respecto a las demás estimaciones de reflectividad, lo cual indicó que se tiene una relación óptima entre el ruido generado por la estimación y la capacidad de la técnica para capturar la variación espacial de los vectores desplazamiento representada por este bloque. Por otro lado, se tuvo un mayor rendimiento para los pronósticos correspondientes a la etapa de madurez respecto a la etapa de iniciación. Esto es debido a las suposiciones consideradas en la técnica de extrapolación presentada. Específicamente, a la consideración de un estado estacionario durante el tiempo de integración en la fase de advección, es decir, en no considerar cambios en la intensidad del campo de reflectividad. Siendo, precisamente la etapa de iniciación donde se presentan las mayores tasas de crecimiento e intensificación del sistema precipitante. Asimismo, en la etapa de iniciación el pronóstico correspondiente al menor tamaño de bloque es el que nuevamente presentó una menor performance; sin embargo no se evidenciaron diferencias entre los demás bloques considerados.



Figura 5.- ETS en función del plazo de pronóstico para los diferentes tamaños de bloque y para el umbral de 15 dBz en las etapas de iniciación (primer columna) y madurez (segunda columna).

Comparación de los pronósticos obtenidos según la técnica empleada

Se evaluó la sensibilidad del pronóstico a la medida de comparación ECM o CC utilizada para la determinación de los vectores desplazamiento. Para la comparación, se utiliza el bloque de 81x81 puntos de retícula y las etapas de iniciación y madurez.

La Figura 6 muestra el estadístico categórico ETS, para las etapas de iniciación y madurez para un umbral de 15 dBz en función del plazo de pronóstico. El mejor desempeño correspondiente a la utilización del ECM sobre el CC se evidenció aproximadamente a partir de los 30 minutos de plazo de pronóstico en el ETS en la etapa de madurez. Sin embargo, para la etapa de iniciación, la diferencia en la calidad de los pronósticos obtenidos a partir de las dos metodologías no fue tan evidente.



Figura 6.- ETS en función del plazo de pronóstico utilizando el ECM (azul) y CC (rojo) como medida de similitud en el cálculo de los vectores desplazamiento y para el umbral de 15 dBz, para las etapas de iniciación (panel izquierdo) y madurez (panel derecho).

Por otra parte, el tiempo de cálculo de los vectores desplazamiento es menor cuando se utiliza el ECM. Esto es debido a que el cálculo del CC requiere realizar una mayor cantidad de operaciones matemáticas. A modo de ejemplo para el bloque de 81x81 puntos de retícula, el tiempo empleado para el cálculo de los vectores desplazamiento a partir del ECM fue de 33.68 segundos, mientras que mediante el CC fue de 96.42 segundos. De esta manera, el buen desempeño del ECM sobre el CC se vio reflejado tanto en la calidad del pronóstico obtenido como en el tiempo de cálculo del mismo.

Sensibilidad del pronóstico al intervalo de tiempo utilizado entre las imágenes sucesivas de reflectividad

Además del cálculo de los vectores desplazamiento a partir de un Δt de 5 minutos, también se realizó con un Δt de 10 minutos entre las imágenes de reflectividad ya que eso permitió modificar la resolución con la que se pueden calcular los vectores desplazamiento. A su vez, se consideró el ECM como medida de similitud y la Detección de Extremos como control de calidad.

La Figura 7 muestra el índice categórico ETS en función del plazo de pronóstico para un umbral de 15 dBz. En este caso se observó que el pronóstico correspondiente a un Δt de 10 minutos presentó un mayor desempeño sobre el calculado a partir de un Δt de 5 minutos. Esto se observó aproximadamente a partir de los 20 minutos de plazo de pronóstico y se evidenció cada vez más a medida que avanzaba el tiempo de pronóstico.

La resolución en velocidad con la que se pueden estimar los vectores desplazamiento con imágenes cada 10 minutos es de 3.3 m/s, mientras que con imágenes cada 5 minutos es de 6.6 m/s. Por lo que tener una mayor resolución puede conducir a un menor error en la estimación de los desplazamientos y por ende a una mejora en el pronóstico.



Figura 7.- ETS en función del plazo de pronóstico para los pronósticos generados a partir de los vectores desplazamiento estimados con un Δt de 5 (azul) y 10 minutos (rojo) para un umbral de 15 dBz, para las etapas de iniciación (primer columna) y madurez (segunda columna).

Para este caso, sin embargo, el tiempo empleado para el calculo de los vectores desplazamiento es mayor en el caso de un Δt de 10 minutos, dado que los desplazamientos máximos permitidos para la comparación entre los bloques ($\delta imáx y \delta jmáx$) son el doble en relación al caso de un Δt de 5 minutos. A modo de ejemplo, el tiempo empleado para el cálculo de los vectores desplazamiento es de 33.38 segundos en el caso de un Δt de 5 minutos y de 117.03 segundos en el caso de un Δt de 10 minutos.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propuso desarrollar un pronóstico de reflectividad, a muy corto plazo, basado en técnicas de extrapolación de datos sintéticos de radar. Para ello, se desarrolló un código propio en Python y Fortran considerando diversas técnicas para el cálculo de los vectores de desplazamiento y un método advectivo semi-lagrangiano.

Respecto al campo de movimiento, se pudo observar que a medida que aumentaba el tamaño de las áreas utilizadas para estimar los vectores desplazamiento, se obtiene un campo de vectores desplazamiento más suavizado. Por otro lado, al analizar la calidad del pronóstico se encontró un peor desempeño para el bloque de menor tamaño. Sin embargo, se pudo encontrar un bloque con una relación óptima entre el ruido generado por la estimación y la capacidad de la técnica para capturar la variación espacial de los vectores desplazamiento representada por ese bloque. Así también, este último presentó una buena correspondencia entre el tiempo de cálculo y el desempeño del pronóstico. Además, al evaluar el impacto en el desempeño del pronóstico y el tiempo de cálculo del uso de las dos medidas de similitud propuestas, se obtuvieron mejores resultados para el ECM sobre el CC. Por otro lado, el pronóstico calculado a partir de un intervalo temporal de 10 minutos entre las imágenes sintéticas de reflectividad presentó una mejor performance respecto a aquel calculado a partir de un intervalo temporal de 5 minutos, lo que indicaría que tener una mayor resolución en el campo de movimiento puede conducir a un menor error en la estimación de los desplazamientos y por ende en una mejora del pronóstico.

Los pronósticos correspondientes a la etapa de madurez presentaron una mejor performance debido a que en esta etapa el sistema ya se encontraba desarrollado y presentaba menores tasas de crecimiento e intensificación respecto a la etapa de iniciación.

La principal limitación de la técnica de extrapolación propuesta reside en no poder identificar áreas de intensificación del sistema precipitante, por lo que en la etapa de desarrollo del sistema se debe buscar otra alternativa para la obtención de información detallada acerca de su ubicación e intensidad. Por otro lado, la técnica empleada presenta resultados ruidosos en el campo de movimiento cuando se analizan los detalles de menor escala asociados al desplazamiento y deformación de los sistemas. La principal ventaja de este tipo de técnicas reside en que, una vez desarrollado el sistema, logra brindar información detallada respecto a la intensidad y dirección de velocidad de desplazamiento del sistema. Así también, el costo computacional para su cálculo no es elevado, por lo que es factible su implementación operativa lo cual se espera, tenga un

impacto positivo sobre los pronósticos de precipitación a muy corto plazo y sobre los avisos y alertas por posible ocurrencia de fenómenos severos.

Agradecimientos. El presente trabajo fue realizado en el marco de una beca de estímulo de la Universidad de Buenos Aires y continúa por una beca de doctorado del CONICET. Las actividades son financiadas por los proyectos PIDDEF 16/2014, ANPCyT PICT 2013-1299, UBACyT 20020130100618BA, UBACyT 20020130100820BA, PICT 2014-1000 y el proyecto de cooperación ALERT.AR.

REFERENCIAS

- Bellon, A., & G. L. Austin. (1978). The evaluation of Two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting Procedure. J. Appl. Meteor., 17, 1778–1787.
- Dixon, M., & Wiener, G. (1993). TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radarbased Methodology. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.
- Germann, U., & Zawadzki, I. (2002). Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology, (4), 2859–2874.
- Laroche, S., & I. Zawadzki, 1994: A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. J. Atmos. Sci., 51, 2664–2682.
- Li, L., Schmid, W., & Joss, J. (1995). Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography. Journal of Applied Meteorology.
- Mecklenburg, S., Joss, J., & Schmid, W. (2000). Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm. Journal of Hydrology, 239(1-4), 46–68.
- Rinehart, R. E., & Garvey, E. T. (1978). Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. Nature.
- Robert, A. (1981). A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. Atmosphere-Ocean, 19(1), 35–46.
- Seed, A. W. (2003). A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. Journal of Applied Meteorology, 42(3), 381–388.