

EXPERIMENTOS IDEALIZADOS SOBRE SUDAMERICA: SENSIBILIDAD DE LA CALIDAD DEL ANÁLISIS FRENTE A DIFERENTES FUENTES DE ERROR

Marcos Saucedo¹, Juan José Ruiz^{1,2}, Andrea Celeste Saulo^{1,2,3}

msaucedo@cima.fcen.uba.ar

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, Conicet, UBA

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN, UBA

³Servicio Meteorológico Nacional

RESUMEN

Este trabajo estudia el impacto, sobre la calidad del análisis, de diferentes fuentes de error presentes en un sistema de asimilación de datos regional basado en el filtro de Kalman por ensambles. Para ello se utiliza el algoritmo Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) acoplado al modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (LETKF-WRF). Con el esquema LETKF-WRF se realizan experimentos idealizados sobre Sudamérica en los cuales, las observaciones son generadas sintéticamente a partir de una simulación de 4 meses de duración realizada con el modelo. Los experimentos se diseñan para evaluar el impacto, sobre la calidad del análisis, de los errores en la condición inicial, errores en las condiciones de borde y errores en la formulación del modelo numérico. Por otra parte, se evalúa el impacto de implementar diferentes técnicas para representar dichas fuentes de error en el sistema de asimilación: perturbación de las condiciones de borde lateral, inflación multiplicativa adaptativa y ensamble físico.

Los resultados indican que la presencia de las fuentes de error puede degradar notablemente la calidad del análisis y que por lo tanto es necesario implementar las técnicas propuestas para mitigar sus efectos. En general, los errores en el modelo y en las condiciones de borde por separado degradan la calidad del análisis en magnitudes similares, aunque sus regiones de influencia son diferentes. Los primeros afectan principalmente las regiones dominadas por la convección y el desarrollo de ondas baroclínicas. Los segundos en cambio tienen su mayor impacto en latitudes medias mientras que en regiones tropicales los mismos no tienen gran influencia.

ABSTRACT

This work studies the impact, upon the analysis quality, of different error sources present in an ensemble based regional data assimilation system. The Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) coupled to the Weather Research and Forecasting (WRF) numerical model (LETKF-WRF) is used in this study. We perform a set of idealized experiments over South-America in which observations are generated from 4-month length model integration. The experiments evaluate the impact, upon the analysis quality, of initial conditions errors, model errors and boundary conditions errors. Another set of experiments is also performed to evaluate the impact of different techniques designed to represent this error sources within the LETKF: boundary conditions perturbation, adaptive multiplicative inflation and multi model ensembles.

Results indicate that the presence of different error sources significantly degrades the analysis quality and hence, it is necessary to implement the proposed techniques in order to mitigate their effects. Over South America, model errors and boundary condition errors degrade analysis quality in a similar quantity, but the regions that are more directly affected by these error sources are quite different. The former ones affect regions of active convection and baroclinic instability mainly in the northern and central part of continental South America, while the later ones affect the mid-latitudes.

Palabras clave: análisis, fuentes de error, LETKF-WRF.

1) INTRODUCCIÓN

La predicción meteorológica operativa a corto plazo consta de 3 grandes pilares, la generación de las condiciones iniciales, el pronóstico numérico determinístico y el pronóstico por ensambles. Dado que históricamente la predicción meteorológica se ha caracterizado por la necesidad de contar con importantes recursos computacionales y por la implementación de técnicas de diversa complejidad, son pocos los centros mundiales de pronóstico capaces de encarar estos 3 aspectos simultáneamente. En la actualidad las diferentes instituciones de nuestro país abocadas a la predicción meteorológica como por ejemplo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) o el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), centran sus mayores esfuerzos en el desarrollo de estos 3 pilares utilizando como una de las herramientas fundamentales el modelo Weather Research and Forecasting (WRF, Skamarock y otros, (2008)). Si bien en nuestro país actualmente la generación de condiciones iniciales aun no está lo suficientemente desarrollada como para generar análisis en forma operativa, existen planes a futuro para incursionar en este aspecto del pronóstico operativo, tal como lo demuestra el trabajo de Dillon y otros (2014).

Este trabajo se propone avanzar en la cuestión de la generación de condiciones iniciales para la producción de pronósticos numéricos por ensambles en forma operativa a escala regional en Sudamérica. La aparición en la última década de algoritmos de asimilación de datos como el Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) (Hunt y otros, (2007)) ofrece una alternativa viable para los fines propuestos, y sumamente ventajosa ya que permite además proveer las condiciones iniciales para generar un pronóstico por ensambles. Sin embargo, la implementación de un sistema de asimilación-pronóstico adecuado para modelos regionales conlleva una serie de complejidades que es necesario abordar a los fines de obtener un sistema óptimo desde el punto de vista de la generación del análisis y también de la calidad de los pronósticos que de él se deriven. Entre las cuestiones que son de vital importancia para el correcto funcionamiento de un sistema de asimilación-pronóstico regional podemos resaltar principalmente 3; las relacionadas con la incertidumbre en la condición inicial, las que provienen de los errores propios del modelo numérico de pronóstico y las asociadas a los errores en las condiciones de borde, tanto lateral como inferior.

En vista de las dificultades mencionadas, el primer objetivo de este trabajo es el de estudiar el impacto de las fuentes de error presentes en un modelado regional en la calidad del análisis resultante. En segunda instancia se busca evaluar el impacto que tiene sobre la calidad del análisis la implementación de diferentes estrategias que buscan mitigar el impacto dado por las diferentes fuentes de error.

2) EXPERIMENTOS IDEALIZADOS LETKF

Para estudiar la sensibilidad del análisis frente a diferentes fuentes de error se realizan experimentos idealizados. En primer lugar se genera una simulación con el modelo WRF utilizando el núcleo dinámico ARW en su versión 3.3.1 (WRF-ARW V3.1.1), la cual será utilizada para generar un conjunto de observaciones sintéticas y para verificar los resultados obtenidos. Esta simulación será mencionada como simulación verdad (SV) ya que será considerada como la verdadera evolución del sistema cuyo estado buscamos estimar. El dominio del experimento abarca Sudamérica con una resolución horizontal de 100 km y 40 niveles verticales sigma-p con tope en 10 hPa. El período simulado es de 4 meses, desde el 1° de junio de 2010 a las 00UTC hasta el 29 de septiembre de 2010 a

las 00UTC. Las condiciones iniciales y de borde son provistas por la base de datos operativa Final Analysis (FNL) de 1° de resolución horizontal. Las parametrizaciones físicas utilizadas para la SV son las siguientes: WSM-5 clases (Hong y otros (2004)) para la microfísica, Kain-Fristch (Kain y Fristch (1993)) para la convección, YSU (Hong y otros (2006)) para la capa límite, Dudhia (Dudhia (1989)) para la radiación de onda corta y RRTM (Mlawer y otros (1997)) para la onda larga. A partir de la SV se generan observaciones con una frecuencia temporal de 6 horas. Las observaciones generadas simulan ser radiosondeos, en donde se observan las siguientes variables: viento en sus componentes zonal y meridional, temperatura, humedad específica y presión en superficie. Los errores, de tipo gaussianos, introducidos a dichas observaciones son de 1 m/s para el viento, 1°C para la temperatura, 1 g/kg para la humedad específica y de 1 hPa para la presión en superficie. La distribución vertical de las observaciones es de 1 observación cada 3 niveles verticales del modelo, dando un total de 13 observaciones de temperatura, humedad y viento en la vertical para cada sondeo. La distribución en la horizontal de las observaciones es al azar y varía de un ciclo de pronóstico al siguiente, con lo que los puntos de observación no son fijos en el tiempo. La densidad de observaciones es de 0.005, lo que es equivalente a tener 28 sondeos en cada tiempo de observación. Esta densidad horizontal de sondeos es relativamente baja si la comparamos con la realidad, aunque la frecuencia temporal es de 2 a 4 veces mayor a lo observado en la realidad. Sin embargo, si comparamos con los sistemas reales de observación que incluye información satelital, el volumen de información observacional generada es mucho menor.

Para la realización de los experimentos idealizados se utiliza el algoritmo LETKF acoplado con el modelo WRF, (LETKF-WRF) desarrollado en la Universidad de Maryland por Miyoshi y Kunii (2012). Dichos experimentos consisten en la simulación de un sistema de asimilación basado en el LETKF-WRF en la cual las observaciones se asimilan cada 6 horas. La cantidad de miembros del ensamble es de 40 en todos los experimentos. El ensamble correspondiente al primer ciclo de asimilación se genera tomando las condiciones de la SV y agregándole perturbaciones aleatorias. Cada una de las perturbaciones se obtienen mediante la resta de dos estados posibles de la atmósfera seleccionados al azar a partir del conjunto provisto por el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha y otros (2010)). La magnitud de las perturbaciones escalada por un factor de 0.2.

Los parámetros de localización utilizados son los siguientes: 400 km en la horizontal (lo que equivale a un radio de influencia de 1460 km) y de 0.4 en la escala logarítmica de presión (1,46 de radio de influencia real en la escala log p).

En este estudio se evalúa el impacto que tiene sobre la calidad del análisis la presencia de 2 fuentes de error o incertidumbre: el error en el modelo, y el error en las condiciones de borde. Al mismo tiempo se evalúan algunas técnicas para representar dichas fuentes de error.

Para el caso de los errores del modelo se considera:

- Inflación multiplicativa adaptativa (Miyoshi (2011)): La inflación multiplicativa adaptativa, incrementa la dispersión del ensamble por un factor multiplicativo que se estima en base a las observaciones y que resulta mayor en aquellas regiones en donde la dispersión del ensamble es sistemáticamente menor que los errores en la media del ensamble. La inflación adaptativa es una herramienta que se aplica en todos los experimentos de este trabajo.
- Ensamble físico: el uso de un ensamble físico consiste en utilizar diferentes parametrizaciones de los procesos no resueltos explícitamente por el modelo numérico. En este estudio, el ensamble físico se construye combinando 2 parametrizaciones diferentes de convección, microfísica y capa límite.

Para el caso de los errores en las condiciones de borde se introducen perturbaciones en las condiciones de borde que son diferentes para cada uno de los miembros del ensamble (Torn y otros (2006)), de forma tal que los distintos miembros que conforman el ensamble utilizan diferentes condiciones de borde lateral en cada ciclo de asimilación-pronóstico.

3) METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN

A fines de comparar la calidad del análisis en los diversos experimentos, se utiliza el Error en Energía Seca (EES) (Zhang y otros (2003) y (2007), Tan y otros (2004)). El EES se define de la siguiente manera:

$$EES = \frac{\left[\rho_{i,j,k} \left(U'_{i,j,k}{}^2 + V'_{i,j,k}{}^2 + (c_{pd}/T_r) T'_{i,j,k}{}^2 + (R_d T_r / P_{ref}^2) P'_{i,j}{}^2 \right) \right]}{2} \quad (1)$$

Donde las variables primadas denotan la diferencia en un dado punto de retícula entre la media del ensamble de análisis y la SV en viento, temperatura y presión en superficie. c_{pd} es el calor específico a presión constante del aire seco, T_r es una temperatura de referencia igual a 287 K, R_d es la constante del aire seco igual a 287.05 J/Kg K, P_{ref} es la presión de superficie de referencia igual a 1000 hPa, ρ representa la densidad del aire y los subíndices i, j y k representan los índices en la dirección zonal, meridional y vertical, respectivamente. Podemos ver de la ecuación (1) que el EES es una diferencia en energía cinética más energía potencial, pesada por la densidad. Al pesar por la densidad, las diferencias en niveles cercanos a la superficie cobran mayor importancia frente a las diferencias en niveles altos.

4) RESULTADOS

Primeramente analizamos el impacto que tiene la presencia de las diferentes fuentes de error en la calidad del análisis. La Figura 1 muestra el EES integrado en todo el dominio y dividido por la masa total para cada ciclo de análisis para los experimentos:

- Modelo Perfecto y Bordes Perfectos (MPBP): tanto el modelo como las condiciones de borde coinciden con los utilizados para generar la SV.
- Modelo Imperfecto y Bordes Perfectos (MIBP): las parametrizaciones físicas del modelo difieren de la SV (se utiliza Betts-Miller-Janjic (Janjic (1994)) para la convección, ETA-Ferrier en microfísica y Mellor-Yamada-Janjic (Janjic (2002)) en capa límite). Todos los miembros del ensamble utilizan las mismas parametrizaciones.
- Modelo Perfecto y Bordes Imperfectos (MPBI): las condiciones de borde difieren de las utilizadas en la SV, empleándose las condiciones de borde provistas por el modelo operativo Global Forecasting System (GFS) de 1° de resolución. Todos los miembros del ensamble comparten las mismas condiciones de borde.
- Modelo Imperfecto y Bordes Imperfectos (MIBI): se utilizan las mismas parametrizaciones físicas y condiciones de borde de los experimentos MIBP y MPBI, respectivamente.

En esta figura podemos apreciar cómo a medida que agregamos fuentes de error en el sistema, la calidad del análisis se degrada notablemente. En general tanto el incluir el error en el modelo como el error en las condiciones de borde por separado tiene un impacto similar, multiplicando la magnitud del error en 7 veces aproximadamente si lo comparamos con el experimento en que tanto los bordes como el modelo son perfectos. Cuando las dos fuentes de error se incluyen al mismo tiempo el error crece unas 12 veces.

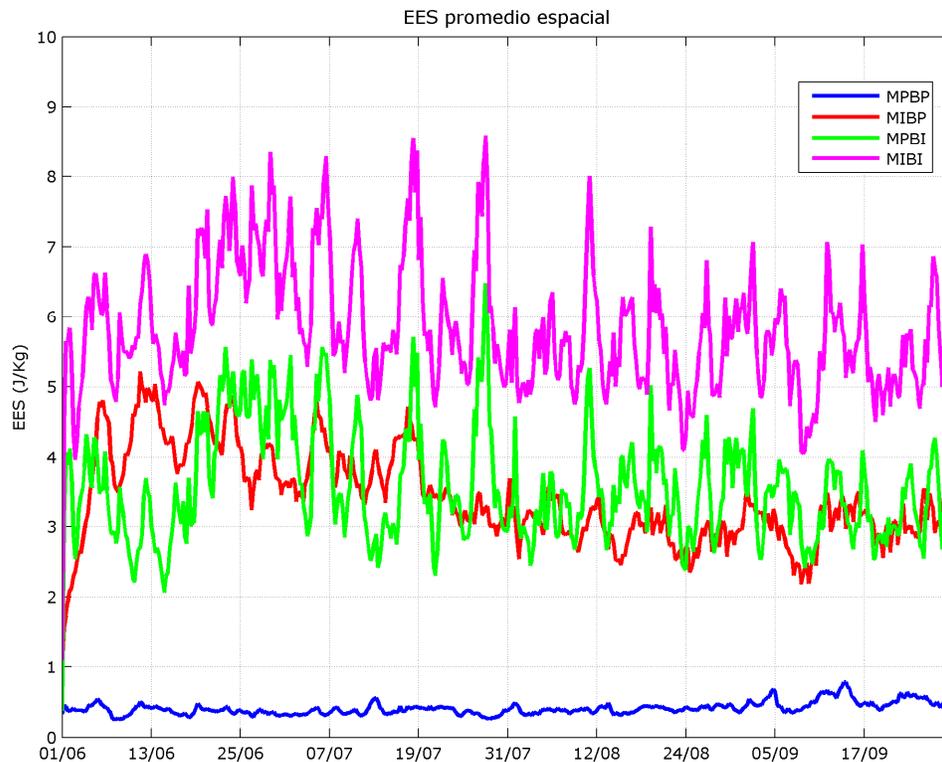


Figura 1: Marcha temporal de EES promediado horizontal y verticalmente para los experimentos de modelo perfecto y bordes perfectos (azul), modelo imperfecto y bordes perfectos (rojo), modelo perfecto y bordes imperfectos (verde) y modelo y bordes imperfectos (magenta).

Dado el aumento de los errores provocados por la inclusión de las diferentes fuentes de error, estudiamos el impacto producido al incluir un tratamiento en el ensamble sobre dichas fuentes. Comenzamos analizando el caso en el que solamente el modelo es imperfecto, en donde se evalúa el impacto de implementar un ensamble físico. Los experimentos a analizar son los siguientes:

- Modelo Imperfecto y Bordes Perfectos (MIBP).
- Modelo Imperfecto y Bordes Perfectos con Ensamble Físico (MIBP-EF): se utilizan diferentes parametrizaciones físicas dentro del ensamble para representar la fuente de error presente en el sistema (Betts-Miller-Janjic y Grell-Devenyi (Grell y Devenyi (2002)) en convección, ETA-Ferrier y Purdue-Lin (Chen y Sun (2002)) en microfísica y Mellor-Yamada-Janjic y Medium Range Forecast (Hong y Pan (1996)) en capa límite).

La Figura 2 muestra el EES promediado espacialmente como en la Figura 1 (Figura 2a), el EES promediado en la vertical y dividido por la masa total de la columna para los dos experimentos (Figura 2b y 2c) y el EES dividido por la masa y promediado en la horizontal para cada nivel vertical del modelo (Figura 2d). En esta figura notamos que el hecho de tener en cuenta el error del modelo en el caso del experimento con ensamble físico, resulta en una reducción del error, lo cual se evidencia tanto en el promedio total, como en el promedio vertical y horizontal. A nivel geográfico se observa que las zonas de mayor error corresponden a las regiones de convección activa como la ITCZ en los trópicos y las de desarrollo baroclínico en latitudes medias y subtropicales al sudeste del continente. También se observa una pequeña y estrecha región de mayor error que coincide con las elevaciones de los Andes,

especialmente entre 20 y 30°S. La distribución vertical de errores (Figura 1d) muestra por su parte el incremento de la magnitud de los errores en toda la troposfera, pero especialmente en los niveles correspondientes a la capa límite planetaria (niveles sigma 1 a 9).

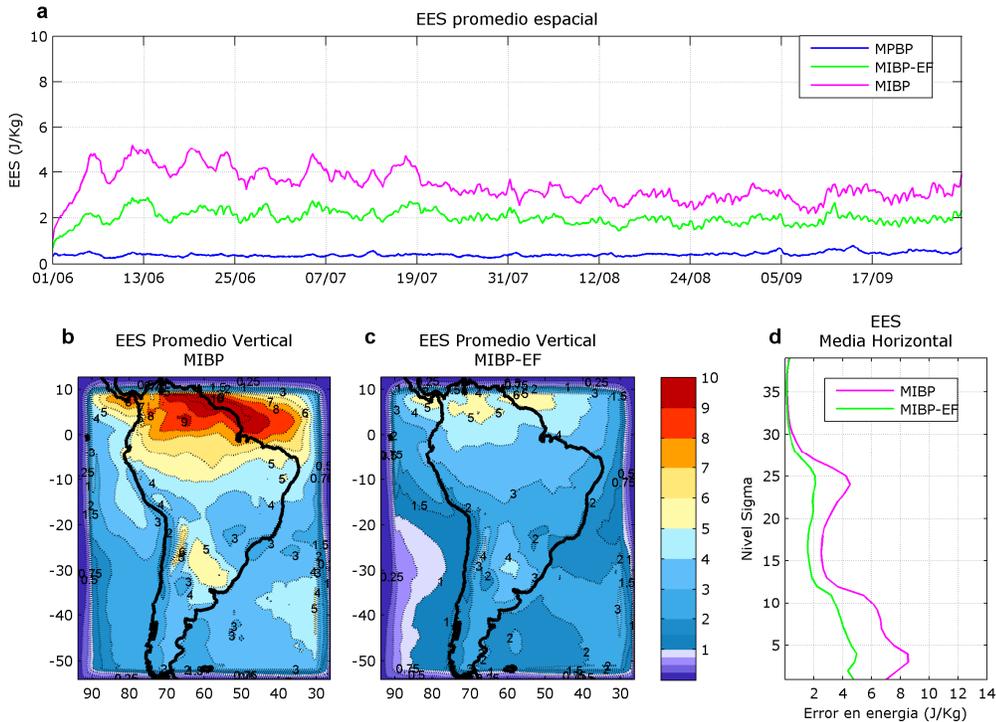


Figura 2: EES de los experimentos MIBP. Marcha temporal de promedio espacial de los experimentos MPBP y MIBP (a); promedio temporal de EES dividido por la masa del sistema (J/Kg) para los experimentos MIBP (b) y MIBP-EF (c); y media temporal de EES promediado horizontalmente (d).

A continuación analizamos la situación en que las condiciones de borde solamente constituyen la fuente de error del sistema. Para esto evaluamos el impacto de perturbar las condiciones de borde al azar a partir de una climatología. De esta manera evaluamos los siguientes experimentos:

- Modelo Perfecto y Bordes Imperfectos (MPBI)
- Modelo Perfecto y Bordes Imperfectos con Bordes Perturbados (MPBI-BP): los distintos miembros del ensamble utilizan condiciones de borde lateral diferentes, las cuales se obtienen restando campos del CFSR al azar, y luego se escalan por un factor de 0.1 y se agregan a las condiciones de borde provenientes del modelo GFS.

La Figura 3 muestra el EES para los experimentos de bordes imperfectos. Vemos aquí que perturbar las condiciones de borde, aun sin reproducir los errores del día, repercute en una mejora del análisis desde el punto de vista global (Figura 3a). Sin embargo, el grado de mejora de incluir las perturbaciones es menor si lo comparamos con el caso de utilizar el ensamble físico en los experimentos de modelo imperfecto. Esto puede estar relacionado con el hecho de utilizar perturbaciones al azar, lo cual hace que las perturbaciones no representen la incertidumbre real del flujo en cada tiempo. Geográficamente notamos que la mayor mejora se produce en latitudes medias, en regiones relativamente alejadas de los bordes (Figuras 3b y 3c). En cambio en latitudes bajas no hay variaciones importantes entre ambos experimentos, dado que el EES es prácticamente similar en ambos casos. Esto se puede explicar por el hecho de que en latitudes medias dominan los sistemas sinópticos provenientes del borde oeste y por lo tanto la información que proveen los mismos influye más fácilmente en el interior del dominio. En los

tropicos en cambio la inestabilidad convectiva actúa en forma más local a la vez que la magnitud de las perturbaciones que ingresan por los bordes es bastante menor que en latitudes medias, lo cual determina que la magnitud de los errores sea mucho menor en estas regiones. Si observamos la distribución del EES en la vertical (Figura 3d) notamos que tanto el aporte al error total como la mejora por introducir perturbaciones en los bordes, son prácticamente similares en toda la troposfera, con máximos en niveles cercanos al tope de la capa límite (nivel sigma 7) y en la troposfera alta en niveles cercanos a los 400 hPa (nivel sigma 18).

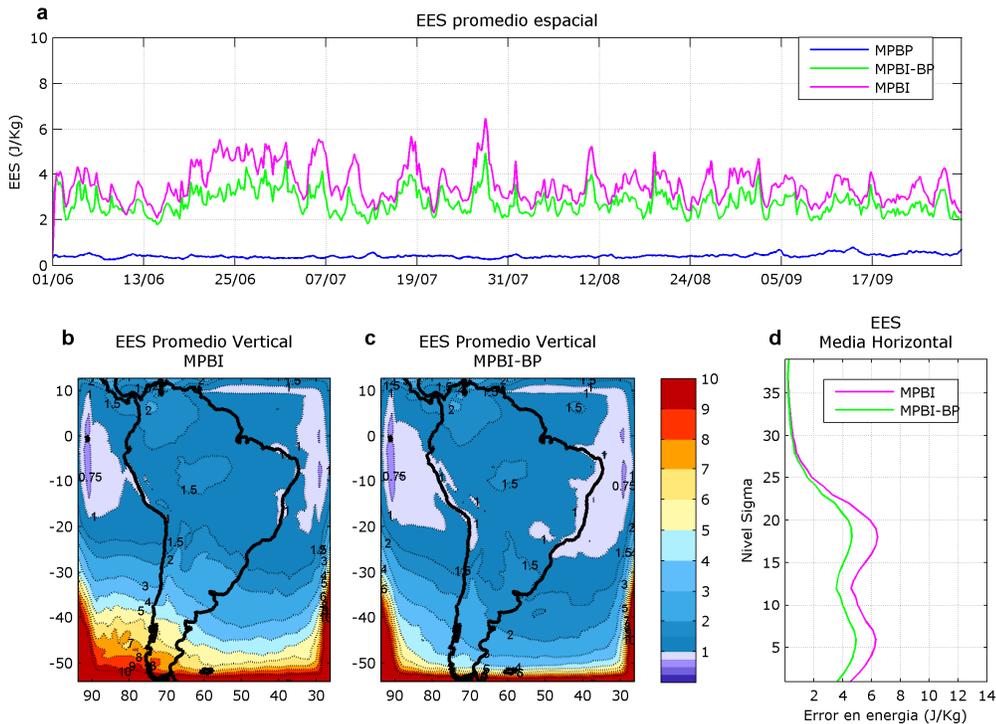


Figura 3: Ídem Figura 2 para los experimentos MPBI y MIBP-BP.

Finalmente, analizamos el impacto de incluir un ensamble físico y perturbaciones en los bordes laterales cuando tenemos las dos fuentes de error presentes en el sistema. De esta forma, los experimentos a analizar son:

- Modelo Imperfecto y Bordes Imperfectos (MIBI).
- Modelo Imperfecto y Bordes Imperfectos con Ensamble Físico y Bordes Perturbados (MIBI-EF-BP): los distintos miembros del ensamble utilizan condiciones de borde lateral y parametrizaciones físicas diferentes.

Los resultados de estos experimentos se muestran en la Figura 4. A primera vista vemos que utilizar un ensamble físico y perturbar las condiciones de borde lateral es beneficioso en términos de errores. Temporalmente notamos la reducción del error en el experimento MIBI-EF-BP en comparación con el MIBI (Figura 4a), como también lo observamos geográficamente (Figuras 4b y 4c) y en el perfil vertical de promedios horizontales (Figura 4d). El patrón espacial de los errores aparenta reproducir una suma entre el error del experimento MIBP y el del experimento MPBI, dado que los máximos de errores se observan en la zona de convección activa asociada a la ITCZ, y en latitudes medias asociada al pasaje de sistemas baroclínicos. A esto también se le agrega una pequeña región que corresponde a los Andes, que también se reproduce en el experimento MIBP. El primer caso se asocia a los errores producidos por la imperfección del modelo y el segundo al producido por la imperfección de las condiciones de borde (Figuras 4b y 4c). Esto también se puede observar en el perfil vertical, donde el

máximo de niveles bajos en comparación con los demás niveles es el resultado del error del modelo, que también se observaba en el experimento MIBP, sumado a los errores de las condiciones de borde que son relativamente similares en todos los niveles de la troposfera (Figura 4d).

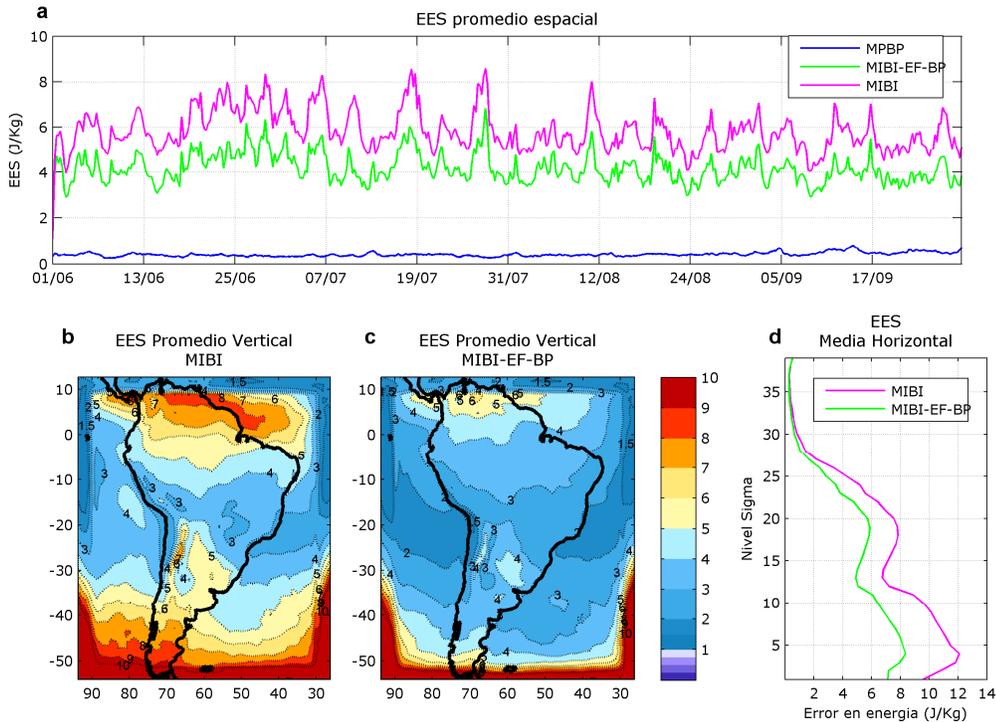


Figura 4: Ídem Figura 2 para los experimentos MIBI y MIBI-EF-BP.

5) CONCLUSIONES

Los resultados de los experimentos idealizados indican que para que la implementación de un esquema de asimilación de datos regional funcione adecuadamente en forma operativa, requiere que el ensamble se construya de forma tal de tener en cuenta las fuentes de error presentes en el sistema. En general, la utilización del ensamble con la inflación adaptativa como único mecanismo para representar los errores del modelo e incrementar en forma acorde la dispersión del ensamble no es suficiente para que el sistema funcione de manera óptima. En cambio, cuando se incluye en la construcción del ensamble la incertidumbre asociada a la fuente de error presente en el sistema, el esquema de asimilación-pronóstico funciona más adecuadamente y por ende los errores se reducen.

Sin embargo, las estrategias adoptadas en este trabajo, ya sea para representar los errores del modelo como de las condiciones de borde, pueden en principio ser mejoradas. En el primer caso la inclusión de un algoritmo de remoción de bias puede ser de gran utilidad para que la técnica de ensamble físico obtenga errores más pequeños. En el caso de las condiciones de borde imperfecto, la utilización de condiciones de borde provistas por un ensamble global debería ayudar a reducir aún más los errores del análisis, ya que se estarían representando más correctamente las incertidumbres provenientes de inestabilidad de mayor escala. Por otro lado, la implementación de otras técnicas de inflación como la aditiva es una alternativa a la inflación multiplicativa adaptativa para aplicar en estos experimentos y que podría ser particularmente útil.

AGRADECIMIENTOS

Los experimentos numéricos de este trabajo fueron realizados en el Sistema de Cómputos de Alto Desempeño del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, adherido al Sistema Nacional de Computación de Alto Desempeño (SNCAD). Este trabajo fue parcialmente financiado por el PIP 11220120100414CO.

REFERENCIAS

Chen, S.-H., y Sun, W.-Y., 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 99–118.

Dillon M.E., Garcia Skabar, Y., Ruiz, J., Kalnay, E., Collini, E.A., Echevarría, P., Saucedo, M., Miyoshi, T., y Kunii, M., 2014: Application of the WRF-LETKF Data Assimilation System over Southern South America: Sensitivity to model physics. Artículo enviado al *Monthly Weather Review* (octubre 2014)

Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Science.*, 46, 3077–3107.

Grell, G. A., y Devenyi, D., 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29 (14), Artículo 1693

Hong, S.-Y., J. Dudhia, y Chen, S.-H., 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.

Hong, S.-Y., Y. Noh, y Dudhia, J., 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318–2341.

Hong, S.-Y., y Pan, H.-L., 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly Weather Review*, 124, 2322–2339.

Hunt, B. R., Kostelich E. J., y Szunyogh I., 2007: Efficient data assimilation for spatio temporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 77, 437-471.

Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review* 122, 927–945.

Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model., NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.

Kain, J., y Fritsch, J., 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Meteorological Monographs, No. 46, American Meteorological Society, 165-170.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., y Clough, S. A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal Geophysical Research*, 102 (D14), 16663–16682.

Miyoshi, T., 2011: The Gaussian approach to adaptive covariance inflation and its implementation with the local ensemble transform Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 139, 1519–1535.

Miyoshi, T., y Kunii, M., 2012: The local ensemble transform Kalman filter with the Weather Research and Forecasting model: experiments with real observations. *Pure Applied Geophysical*, 169 (321), DOI: 10.1007/s00 024–011–0373–4.

Saha, S., y co-autores, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 91, 1015-1057.

Skamarock, W. C., y co-autores, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical. Note NCAR/ TN-4751STR, 113 pp.

Tan, Z., Zhang, F., Snyder, C., y Rotunno, R., 2004: Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Experiments with Parameterized Convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61, 1794-1804.

Torn, R. D., Hakim, G. J., y Snyder, C., 2006: Boundary conditions for limited-area ensemble Kalman filters. *Monthly Weather Review*, 134, 2490-2502.

Zhang, F., Snyder, C., y Rotunno, R., 2003: Effects of Moist Convection on Mesoscale Predictability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 1173-1185.

Zhang, F., Bei, N., Rotunno, R., Snyder, C, y. Epifanio, C., 2007: Mesoscale Predictability of Moist Baroclinic Waves: Convection-Permitting Experiments and Multistage Error Growth Dynamics, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 3579-3594.