

Aplicación y evaluación del modelo MM5 para pronóstico de lluvia y temperatura en Chihuahua, México

Application and evaluation of the MM5 model to forecast precipitation and temperature in Chihuahua, Mexico

VÍCTOR MANUEL REYES-GÓMEZ^{1,3}, DANIEL NÚÑEZ-LÓPEZ¹, OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES-OLIVAS² Y VÍCTOR DIEGO QUIÑONEZ-QUINTANA²

Recibido: Febrero 11, 2010

Aceptado: Marzo 23, 2010

Resumen

En Chihuahua no existe un modelo local que permita pronosticar a corto plazo las posibilidades extremas de lluvia y temperatura, que considere los procesos atmosféricos de meso-escala. El objetivo del presente estudio fue adaptar y probar la eficiencia del modelo MM5 para predecir condiciones extremas de temperatura y lluvia en Chihuahua. Se integró un sistema de pronóstico que opera en una estación de trabajo donde se pueden generar mapas de pronóstico de lluvia y temperatura cada hora, hasta por dos días, para todo el estado de Chihuahua sobre una malla con resolución de 8 km. Las pruebas visuales muestran que el MM5 acierta en más del 90% de los eventos pluviométricos y puede estimar correctamente la lámina de lluvia y las temperaturas extremas en alrededor del 80% de los pronósticos. Para lluvia, el modelo puede subestimar en la región de planicies y valles de Chihuahua y predecir correctamente en la zona serrana; en tanto que para temperaturas máxima y mínima (respectivamente medidas a las 15:00 y 7:00), en general sobreestima entre 0.75 y 2.14°C. Las pruebas estadísticas de eficiencia del modelo para pronóstico de lluvia y temperaturas extremas, muestran valores significativos para poderlo utilizar con alto grado de confianza en Chihuahua (valores de eficiencia del modelo superiores a 0.57).

Palabras Clave: Modelo meteorológico de mesoescala, pronóstico local de tiempo, alta resolución, validación del modelo, modelo MM5.

Abstract

In Chihuahua there is no local model to forecast short-term extreme rainfall and temperature events, considered as atmospheric meso-scale. This study was designed to adapt and evaluate the efficiency of the model MM5 to predict extremes temperature and rain in Chihuahua. A forecast system was programmed to operate from a workstation where rain and temperature forecast maps were generated every hour, for two days, for the State of Chihuahua on a mesh with 8 km resolution. Visual evidence shows that the MM5 was successful in more than 90 % of the rain events and can forecast correctly the rainfall and extreme temperatures in about 80 % of the times. With respect to rain, the model may underestimate the precipitation on the plains and valleys of Chihuahua and predicts in correctly in the mountains region. For minimum and maximum temperatures (respectively, measured at 7:00 and 15:00 hrs.), the model generally overestimates these values for up to forecast rain and extreme temperatures, show that this model can be used with a high degree of confidence in Chihuahua (the model efficiency exceeded 0.57 values).

Keywords: Mesoscale meteorological model, local weather forecast, high resolution, model validation, MM5 model.

¹ Instituto de Ecología, A.C. (INECOL). Centro Regional Chihuahua, Red MAS. Km 33.300, carretera Chihuahua-Ojinaga, Cd. Aldama, Chih. C.P. 32900. Tel. (614) 451 09 05.

² Departamento de Recursos Naturales, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua., Periférico Francisco R. Almada, Km 1.

³ Dirección electrónica del autor de correspondencia: victor.reyes@inecol.edu.mx

Introducción

En Chihuahua, los fenómenos hidro-meteorológicos extremos que ocasionan mayores desastres son las lluvias torrenciales, nevadas, granizadas, inundaciones y sequías (Pérez, 2004), ya que pueden impactar negativamente a la sociedad, al medio ambiente y todas las actividades económicas del estado.

En otras regiones del mundo, como medidas de prevención de desastres, se han desarrollado modelos numéricos como el de Mesoescala V. 5.0 (MM5), el ETA, el Global de Aviación de Estados Unidos de Norteamérica (AVN por sus siglas en inglés) y el modelo de Investigación y Pronóstico del Clima (Weather Research and Forecasting WRF). Estos modelos permiten simular la dinámica atmosférica de meso-escala de una región en particular hasta por 72 h, generalmente incluyen: precipitación, temperatura y eventos meteorológicos globales como el ENSO.

Gracias al desarrollo de la informática, los modelos numéricos fueron prácticos sólo hasta la segunda mitad del siglo XX (Charney *et al.*, 1950; Richardson, 1916; Magaña, 2004). Los cambios y adecuaciones de los modelos numéricos han sido enfocados a la creación de modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) y Atmosféricos de Área Limitada (LAM, por sus siglas en inglés) los cuales consideran sólo una sub-región del globo para simulaciones de tiempo, entre los cuales destacan el MM5, el ETA, el WRF (Stauffer y Seaman, 1990).

Los modelos más sofisticados de predicción en tiempo real no son del todo perfectos, especialmente cuando la escala espacial a utilizar requiere mayor detalle y las parametrizaciones de las nubes dejan de ser válidas, llevando a errores en pronósticos de la cantidad de precipitación, parámetro meteorológico más relevante en lo que se refiere a predicción del tiempo a escala local (Pérez, 2004; Stern *et al.*, 1986). En algunas partes del mundo, el MM5 ha sido adaptado a diversas escalas de resolución de malla para regiones con terrenos muy heterogéneos de relieve muy accidentado (Colle *et al.*, 1999; Das, 2005), concluyendo sobre la gran robustez del MM5,

siempre y cuando se realicen anidaciones más locales y se cuide el aspecto de resolución y condiciones físicas del terreno, como altitudes y fragmentación del paisaje.

La mayoría de los censos bibliográficos indican que en México, el modelo MM5 es el más usado por su robustez y cantidad de variables de salida (Pérez, 2004; Magaña, 2004; Lobato *et al.*, 2005; Kislova *et al.*, 2009 y Zitácuaro y Caetano, 2004). Además, presenta la ventaja de generar información que permite el análisis de las condiciones regionales del tiempo y su impacto ocasionado por cambios en el uso de suelo. Si bien es cierto que requiere de capacidades humanas especializadas, existen al menos unos cinco usuarios en México que han podido desarrollar capacidades para el uso del MM5, sobre todo en zonas de desastres por huracanes como en el centro sur de México y la costa occidental de California (Instituciones como el SMN, La Marina, CICESE, CCA-UNAM, SMN). No se optó por el modelo WRF que es muy similar al MM5 porque está en fase de validación de su robustez y capacidad (Kerbyson *et al.*, 2007).

Para el caso de México, el MM5 ha sido utilizado para simular o predecir circulaciones atmosféricas a nivel regional y campos de viento superficial de altura geopotencial (Hernández, 1999), para análisis de contaminación atmosférica y dispersión de contaminantes en la Ciudad de México (Salas, 2000; García, 2002; Fuentes *et al.*, 1993; Jazcilevich *et al.*, 2002). Desde 1996 el MM5 se ha utilizado experimentalmente como una herramienta de pronóstico operativo del tiempo meteorológico en México (Magaña *et al.*, 2002). Sin embargo, poco se ha hecho para evaluar de forma objetiva la calidad de las simulaciones y de los pronósticos. Aún no se tiene la certeza sobre cuál es la máxima resolución espacial a utilizar

en el MM5 para obtener resultados útiles. En síntesis, la originalidad de este estudio radica en la adaptación y validación de un modelo de mesoescala a las condiciones locales estatales como Chihuahua, que ayude a la prevención de riesgos por condiciones extremas de lluvias o temperaturas frías o calurosas, así como la creación de bancos de información que puedan ser usados por el sector educativo y científico como entradas de otros modelos más complejos sobre la prevención de incendios, modelos hidrológicos y ecológicos.

Objetivo. Adaptar y validar un sistema de pronóstico de condiciones extremas de precipitación y temperatura, específico para el estado de Chihuahua, a través del modelo de meso-escala conocido como MM5.

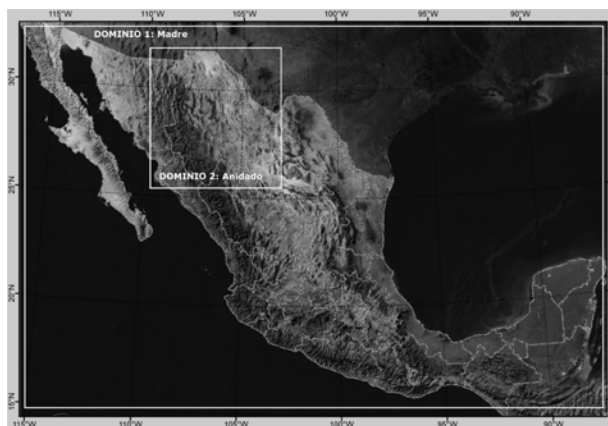
Materiales y métodos

La zona de estudio. La región de estudio, abarca el estado de Chihuahua localizado al norte del país, ubicado entre las latitudes norte de 25° 30' y 31° 47' y longitudes oeste 103° 18' y 109° 7'; su altitud máxima es 3300 m (cerro Mohinora). El paisaje de Chihuahua está conformado por tres grandes regiones: sierra, llanura o meseta y desierto, que se distribuyen de oeste a este en forma de grandes bandas (INEGI, 2004). Los climas predominantes son templado húmedo (Cw) en la zona de montañas, seco semiárido en los valles y seco árido en las partes más bajas del paisaje (García, 1973).

Pronóstico de lluvia y temperaturas extremas. Para el pronóstico de lluvia y temperatura, se establecieron dos dominios donde se probó el pronóstico de lluvia y temperatura con el MM5. El dominio uno (D1 denominado madre), abarca todo México, donde se incluye el segundo dominio que abarca localmente el estado de Chihuahua (D2 o anidado, en la Figura 1). El D1 tiene como centro las coordenadas 24° N y -100.5° W, el D2 está centrado en los 29.19° N y los 107.61° W. Los puntos por malla son 120X170 en el caso del D1 y de 118X101 para el D2, respectivamente, con una resolución de mallado de 24 y 8 km.

Las condiciones inicial y de frontera fueron adquiridas a intervalos de 6 h de los pronósticos a escala global, realizados diariamente en el Departamento de Aviación de Estados Unidos (AVN, por sus siglas en inglés), en conjunto con el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP, por sus siglas en inglés). Las variables necesarias para las corridas del MM5 fueron: componente zonal y meridional (u y v) del viento, temperatura, humedad relativa, presión reducida al nivel del mar y altura geopotencial. Esas variables se adquirieron de los reportes de radio sondas de México y región fronteriza de E.U.A. en los niveles: 1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150 y 100 mb con excepción de la humedad relativa que sólo se reporta hasta el a nivel de 300 mb.

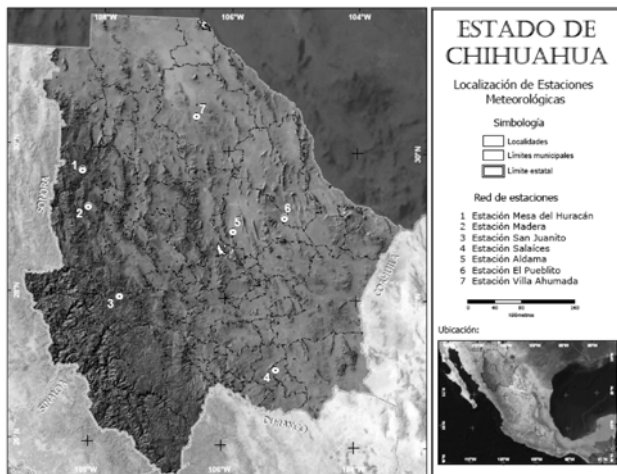
Figura 1. Dominios creados para el pronóstico del tiempo en Chihuahua.



Validación del modelo MM5 para Chihuahua. Para la validación del MM5 en el dominio de Chihuahua, primero se realizó el pronóstico diario de lluvia y temperatura durante tres meses del periodo estival en Chihuahua (julio, agosto y septiembre del 2008), así como para uno de los meses más fríos (enero 2009), con lo que se cubrieron condiciones extremas del periodo estival en Chihuahua y la época más fría del año. Los pronósticos diarios fueron para 48 horas y siguiendo los criterios de validación de modelos descritos en Mayer y Buttler (1993),

se evaluó visualmente el pronóstico de lluvia para julio 2008, comparando la coincidencia de días con y sin lluvia generadas con el MM5 vs los días con y sin lluvia registrados en una red de siete estaciones automatizadas (Figura 2); distribuidas desde las zonas templadas frías (sitios 1 – 3) hasta las zonas áridas y semiáridas (sitios 4 – 7).

Figura 2. Red de estaciones de control y validación del modelo.



La segunda forma de evaluación fue la confrontación numérica de valores pronosticados de lluvia y temperatura con valores observados y el análisis del grado de correlación en los sitios de control. En el caso de las temperaturas extremas, se compararon los valores más altos en los sitios de control (15:00 del mes de julio 2008) y los más bajos para la estación de San Juanito considerada una de las zonas más frías del estado (7:00 de enero 2009); para la lluvia, se tomó en cuenta el pronóstico de la lluvia acumulada en 24 h (medido a las 9:00) para el mes de agosto del 2008 en todos los sitios.

En la primera evaluación, se estimó el porcentaje de aciertos como un primer criterio de validación, en la segunda forma de evaluación se estimaron los promedios de sobre o subestimación del modelo y el valor de correlación entre lo observado y lo pronosticado. Estadísticamente, la aptitud del modelo para

predecir lluvia y temperatura se evaluó usando el criterio conocido como EM (Eficiencia del modelo), cuya relación propuesta por Mayer y Butler (1993) está dada por:

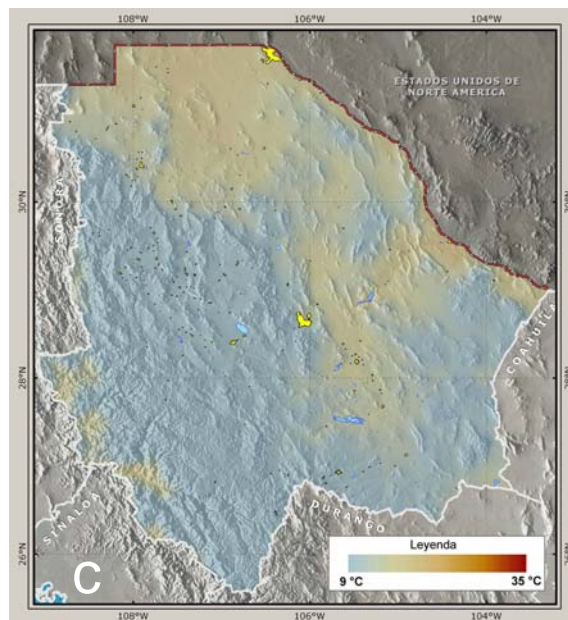
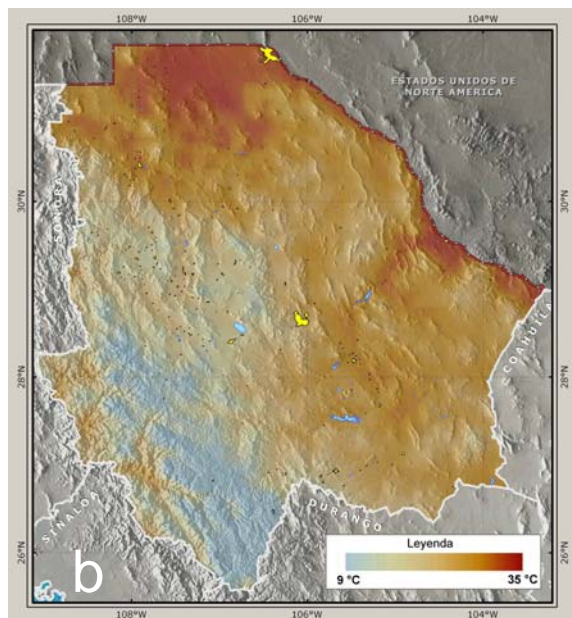
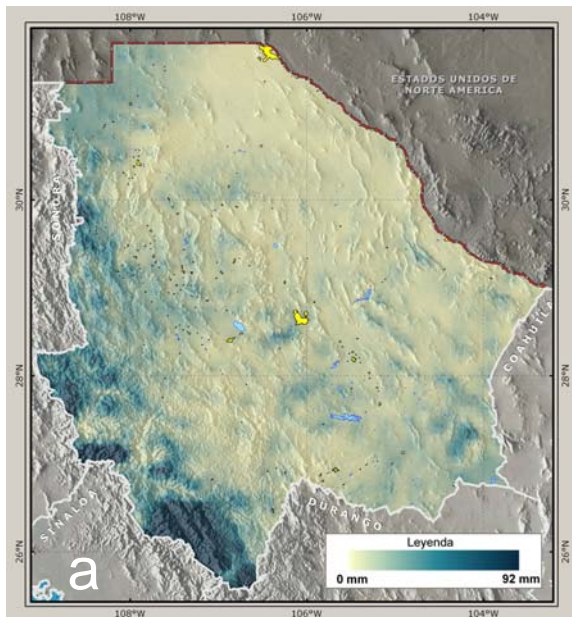
$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2}$$

Donde EM es la eficiencia del modelo; X_i es el valor observado; Y_i es el valor simulado, \bar{X}_i el valor medio observado, N es el número de pares comparados de valores observados y simulados.

Resultados y discusión

Información de salida. El sistema de pronóstico genera mapas de lluvia y temperatura cada hora durante un lapso de tiempo de 48 h (Figura 3). En el caso de la lluvia, las imágenes de los mapas representan la lámina de lluvia acumulada hora por hora (en mm) y en las imágenes de temperatura, se refleja el valor hora por hora (en °C). Son proyecciones que muestran geográficamente, la distribución espacial de las condiciones que prevalecerán en todo el estado de Chihuahua durante los próximos dos días. En la Figura 3, se observan los mapas de pronóstico, respectivamente para lluvia, temperatura extrema a las 7:00 y temperatura extrema a las 15:00, donde se puede apreciar la forma de cómo el sistema genera información visual del pronóstico del tiempo para el estado de Chihuahua. Los colores de los mapas de precipitación van desde las tonalidades más claras cuando el pronóstico de lluvia es menor, hasta los colores azules intensos para los pronósticos de lluvia superiores a los 50 mm; en el caso de los mapas de temperatura, la escala de colores va desde los tonos azules para temperaturas cercanas o menores que cero, hasta los de tonos rojos o marrones intensos, que significan temperaturas mayores a los 30°C.

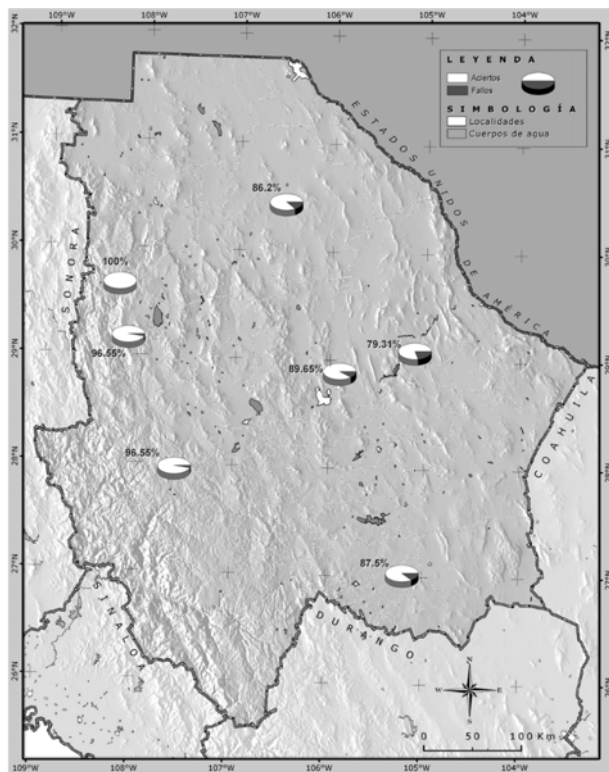
Figura 3. Mapas de pronóstico con MM5. a = Precipitación, b = Temperatura en la hora más calurosa, c = Temperatura en la hora más fría.



más altos de aciertos se presentaron para la zona serrana, en los sitios de San Juanito, Mesa del Huracán y Madera (96.5 %, 100 % y 96.5 % respectivamente), los valores más bajos fueron en las zonas áridas y semiáridas de Chihuahua, en los sitios de Vila Ahumada, Salaices, Aldama y El Pueblito, con rangos entre 86 y 90 % de aciertos. Estos resultados, permiten constatar que el sistema de pronóstico de lluvia con el MM5 adaptado para Chihuahua, es muy eficiente, ya que la resolución de malla es de 8 km; superando otros sistemas similares como el de Colle et al. (1999) y de Das (2005) quienes después de probar distintos tamaños de malla con esquemas microfísicos distintos, lograron para zonas montañosas como las de Oregon y Washington (USA) y la del Himalaya (India), una escala horizontal entre 10 y 32 km, con condiciones de relieve similares a lo accidentado del terreno de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental de Chihuahua. Este tipo de salidas son muy valiosas en programas de planeación de la agricultura, manejo de agua, transporte público, industria, recreaciones y prevención de riesgos a corto plazo, como tormentas, heladas, nevadas y grandes avenidas de ríos (Das, 2005), así como en el sector académico y científico como materia prima de entrada en otros modelos ecohidrológicos, de manejo de cuencas y para prevención de incendios forestales.

Validación visual del pronóstico de precipitación. En la Figura 4 se presentan los porcentajes de acierto en la coincidencia (MM5 vs observado) de los eventos pluviométricos de agosto 2008 en los siete puntos de control. Los rangos de acierto se mantuvieron entre el 86 y 100%, con un promedio estatal de aciertos del 90.8 %. Los valores

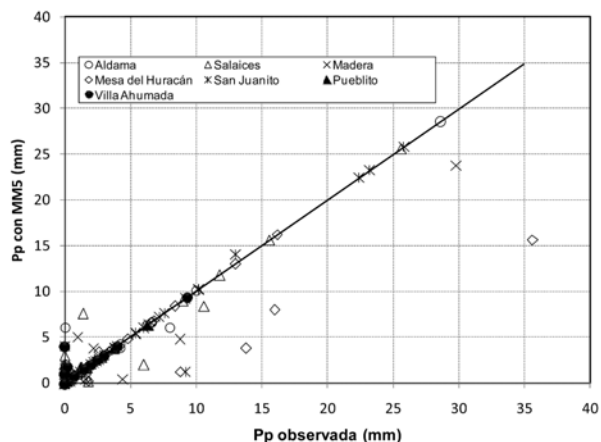
Figura 4. Relación de aciertos de la coincidencia del pronóstico de lluvia con el MM5 y los observados en los puntos de control.



Validación numérica del pronóstico de precipitación. En el segundo tipo de evaluación del MM5, se confrontaron los valores de lluvia acumulada en 24 h estimada con MM5 vs observada en los sitios de control (Figura 5). Como se puede apreciar en el diagrama de dispersión; hay una clara tendencia positiva entre los valores de lluvia estimados con el MM5 y los observados.

Se observa que el MM5 sobreestima las lluvias menores de 5mm, como se puede ver para los casos de Villa Ahumada, Aldama, y Salaices (promedios de sobreestimación S-S-p en Cuadro 1); para lluvias entre 5 y 16 mm, el MM5 subestima las precipitaciones como se puede apreciar en algunos eventos pluviométricos de los sitios de Mesa del Huracán, Madera y San Juanito, respectivamente, con subestimaciones promedio de -1.6, -0.36 y -0.11 mm.

Figura 5. Comparación de valores de precipitación pluvial (Pp) pronosticada y observada para el mes de agosto 2008 en los sitios control.



Para rangos pluviométricos entre 17 y 25 mm de lluvia, el modelo simula casi perfectamente lo que lloverá, llegando a presentarse subestimaciones elevadas en algunos eventos pluviométricos mayores a los 25 mm, como en el caso de la lluvia observada de 35 mm en la estación de Mesa del Huracán que el MM5 pronosticó una altura de 15 mm, derivándose una subestimación de -20 mm (Figura 5). A escala estatal, al considerar el total de sitios, el promedio de S-S-p (Cuadro 1), refleja una subestimación promedio de -0.153 mm en el pronóstico de lluvia.

Con el propósito de reforzar la evaluación del MM5 para el pronóstico de lluvia, se estimó la correlación de Pearson por sitio y para el total de ellos (Cuadro 1). Como puede observarse, los coeficientes de correlación todos fueron muy elevados ($r > 0.86$), lo que como criterio indica que el MM5 es muy apto para pronosticar lluvias hasta por 48 h en Chihuahua. El grado tan elevado de significancia de esas correlaciones se constató con los valores de probabilidad P, todos menores a 0.001 ($n-2$), presentando incluso un valor de $r = 0.933$ cuando se considera el total de sitios, lo que reafirma la robustez del MM5 en este tipo de pronósticos.

Cuadro 1. Correlación de Pearson entre lluvia pronosticada con MM5 y lluvia observada en agosto 2008.

Sitio	S-S-p mm	r	P
Aldama	0.231	0.976	0.001
Salaices	0.156	0.962	0.001
Madera	-0.317	0.965	0.001
Mesa de Huracán	-1.610	0.845	0.001
San Juanito	-0.114	0.977	0.001
Pueblito	0.362	0.868	0.001
Villa Ahumada	0.259	0.914	0.001
Total de sitios	-0.153	0.933	0.001

S-S-p = Sobre o sub estimación promedio generada en el pronóstico de lluvia con MM5, r = correlación de Pearson entre los valores de lluvia con MM5 vs observados, P = probabilidad de error del modelo de correlación (n-2).

Validación numérica del pronóstico de las temperaturas extremas. En el caso del pronóstico de temperaturas extremas, el MM5 generó sobre y subestimaciones en los dos horarios considerados como valores mínimo y máximo (7:00 y 15:00, respectivamente). Para el pronóstico de la temperatura máxima (Figura 6), las mayores dispersiones por sitio se observan en la Mesa del Huracán y Villa Ahumada, respectivamente, con una sobrestimación extrema de 11 °C y una subestimación de -7 °C, cuyos promedios (S-S-p) se reflejaron de 3.5 °C y -1.2 °C en ambos casos (Cuadro 2). En los otros sitios, los valores de S-S-p reflejaron valores intermedios con promedios entre 0.07 °C y -0.7 °C, y de 0.75°C cuando se considera el total de sitios. En el caso de la temperatura mínima (Figura 7), para el mes de enero en la estación San Juanito, se observó una dispersión más importante en las temperaturas bajo cero que en aquellas positivas, con sobreestimaciones que pueden alcanzar los 7 °C, reflejándose un promedio de S-S-p de 2.14 °C para esa zona serrana de Chihuahua.

Los resultados del grado de correlación entre el pronóstico y lo observado, se ilustran a través del valor de r en el Cuadro 2, que como criterio de evaluación del MM5 revela una elevada significancia para el pronóstico de las dos temperaturas extremas; exceptuando el sitio Salaices (con $r = 0.25$ y $P = 0.1$), los demás sitios mostraron coeficientes r mayores a 0.4 con probabilidades menores a 0.05, que indica una elevada significancia y por ende un pronóstico bastante aceptable.

Figura 6. Comparación de valores de temperatura máxima (Tmax) pronosticada y observada para el mes de julio 2008 en los sitios control.

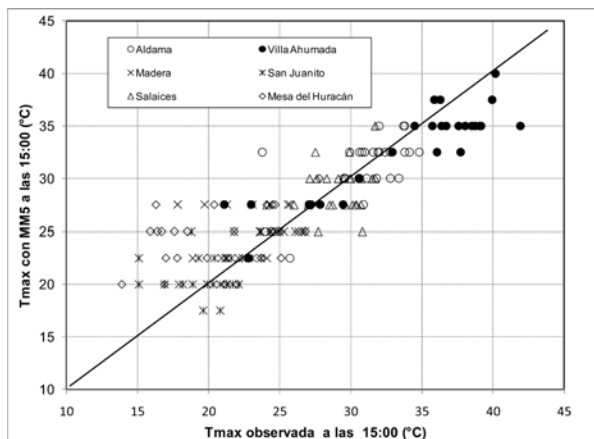
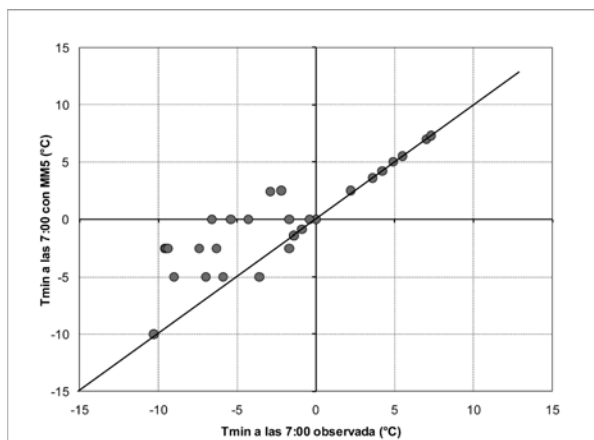


Figura 7. Comparación de valores de temperatura mínima (Tmin) pronosticada y observada para el mes de enero 2009 en la estación San Juanito.



Cuadro 2. Correlación de Pearson entre temperaturas extremas pronosticadas con MM5 vs observadas.

Condición	Sitio	S-S-p °C	r	P
Tmax	Aldama	0.077	0.482	0.010
	Salaices	-0.126	0.246	0.100
	Madera	1.389	0.512	0.010
	Mesa de Huracán	3.563	0.432	0.020
	San Juanito	0.911	0.391	0.050
	Villa Ahumada	-1.209	0.892	0.001
	Total del sitio	0.748	0.864	0.001
Tmin	San Juanito	2.147	0.865	0.001

S-S-p=Sobre o sub estimación promedio generada en el pronóstico de temperaturas extremas con MM5, r=correlación de Pearson entre los valores de temperaturas extremas con MM5 vs observados, Tmax=temperatura máxima medida a las 15:00, Tmin=temperatura mínima medida a las 7:00, P=probabilidad de error del modelo de correlación (n-2).

Con estos resultados de validación visual y numérica, queda demostrado que el MM5 es una herramienta que permite predecir con bastante certitud las condiciones extremas de lluvia y temperatura a escala regional o estatal (p.e. para Chihuahua), que debe tomarse con reserva el grado de imprecisión puntual en los sitios de control, ya que se sabe que el pronóstico con este tipo de modelos de mesoescala, es sobre todo con resoluciones de mallado mayores a los 6 km. Este tipo de pronósticos puede ser mejorado con procesos como el de asimilación, que considera nuevas condiciones iniciales de tiempo en superficie, que mejora el re-grillado horizontal inicial al comienzo del cálculo del pronóstico del tiempo con el MM5.

Prueba de eficiencia del MM5. Este criterio estadístico (descrito en materiales y métodos), indica de forma análoga al valor de r^2 , que con un valor nulo EM lo suficientemente diferente de $-\infty$ a 1, cualquier modelo sería inapropiado para el pronóstico en cuestión. Contrariamente,

más se encuentre un valor cercano de 1, mejor será la eficiencia del modelo, de hecho se acepta que si EM es ≥ 0.5 es suficientemente correcto para simular (Mayer y Butler, 1993). Los resultados promedio de la prueba EM para validar el MM5, se muestran en el Cuadro 3 donde se aprecia que en los tres casos, el valor de EM es superior a 0.5, lo que indica que el MM5 para Chihuahua es lo suficientemente correcto para pronosticar las temperaturas extremas y la precipitación en el estado de Chihuahua. Sin embargo, debe mencionarse que el modelo deberá evaluarse en una segunda etapa, cuando el proceso de asimilación (LITTLE) sea incluido en el sistema implementado para Chihuahua, el pronóstico deberá evaluarse a diversas escalas horizontales (4, 6, 8, 10 y 20 km) y al menos tres verticales (100, 400 y 850 mb), para encontrar una mayor certeza en el pronóstico del tiempo para todo el gradiente orográfico del estado.

De igual forma, se debe considerar que Chihuahua, se encuentra en una zona crítica desde el punto de vista de las barreras orográficas y de los procesos atmosféricos que condicionan el clima de la región, como lo han demostrado Reyes *et al.* (1991) quienes señalan que la región del Vertiente del Golfo de México (donde se encuentra el estado) se deben considerar distintos niveles verticales para el entendimiento de los procesos de circulación atmosférica, al menos durante los tres meses del periodo estival (julio-septiembre).

Cuadro 3. Prueba de eficiencia del modelo MM5.

Condición	$\sum(X_i - Y_i)^2$	$\sum(X_i - \bar{X}_i)^2$	EM
Temperatura a las 15:00	1726.8	7740.6	0.78
Temperatura a las 7:00	354.3	823.9	0.57
Lluvia acumulada (24 h)	953.01	7211.2	0.87

X_i = Valor observado, Y_i = valor pronosticado con MM5, \bar{X}_i = promedio del valor observado, EM= Eficiencia del modelo.

Conclusiones

El modelo de meso-escala MM5 adaptado para el estado de Chihuahua, logra pronosticar lluvia y temperaturas extremas con exactitud estadística confiable. En términos de coincidencia de eventos pluviométricos, el MM5 presenta una aptitud muy elevada para predecir si durante las próximas 48 lloverá o no, con una mayor certitud en la zona serrana (> 96 %) que en la desértica (entre 86 y 96 % de aciertos), lo que indica que debe seguirse explorando con otras escalas de mallado horizontal y vertical para lograr una mayor confianza. A escala puntual, el modelo MM5 tiende a sobre estimar las lluvias menores de 5 mm y a subestimar las lluvias con rangos entre 6 y 16 mm; para lluvias entre 17 y 25 mm, se presentó una certitud cercana al 100 % de eventos y una subestimación para lluvias mayores a los 26 mm.

Para el caso de temperaturas, el modelo puede sobre o sub estimar las máximas, con rangos extremos entre 11 y -7 °C si se consideran puntualmente los sitios de control. Cuando se considera el total de sitios, a una escala estatal, el modelo produce un promedio de 0.75 °C de sobrestimación en la temperatura máxima, observada a las 15:00 en el mes de julio del 2008. Para extremo frío de las temperaturas, el MM5 puede generar sobrestimaciones de hasta 7 °C, con un promedio para San Juanito de 2.5 °C para temperaturas bajo cero. Los valores de correlación de Pearson para lluvia, fueron muy aceptables (>0.84), indicando una elevada eficiencia del modelo para el pronóstico de lluvia, constatado de igual manera con el valor de EF (0.87); esos valores de correlación en temperaturas extremas se mantuvieron para el caso de las mínimas (0.87), observándose ligeramente menores para el caso de las máximas pero lo suficientemente significantes ($r > 0.4$, con $P < 0.05$) para probar estadísticamente la bondad del MM5. Las pruebas de eficiencia reforzaron la validación del modelo, los valores encontrados de EF

fueron entre 0.57 y 0.78, respectivamente para temperaturas máximas y mínimas.

Se debe contemplar en la adaptación y la validación de otros modelos como el WRF, ETA en un futuro inmediato, que sustenten este pronóstico con MM5, ya que si bien en Chihuahua los mayores desastres, como huracanes y tormentas, no azotan directamente al territorio estatal, sí es muy frecuente tener consecuencias derivadas de tales fenómenos hidrometeorológicos, como inundaciones y oleadas de frío y calor.

Agradecimientos

Al Fondo Mixto del Gobierno del Estado de Chihuahua, por su financiamiento otorgado a través de la convocatoria FOMIX-Chihuahua, 2005.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo otorgado para la realización del presente proyecto, convocatoria FOMIX-CONACYT-2005.


Al Instituto de Ecología, A.C. (INECOL-CEISS) por su apoyo brindado durante la ejecución del proyecto.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM), por el apoyo y consejos recibidos durante la puesta en marcha del MM5 y por la automatización de la operatividad del MM5.

A la gerencia regional de CONAFOR- Río Bravo, por permitirnos el acceso a su red de estaciones automatizadas de clima del programa de incendios forestales en el estado de Chihuahua.

Literatura citada

- CHARNEY, J.G., R. Fjortoft, and J. V. Newman. 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, Vol. 2. 237-254 pp.
- COLLE A., B., J. Kenneth, J. Westric and C.F. Mass, 1999. Evaluation of MM5 and Eta-10 Precipitation Forecasts over the Pacific Northwest during the Cool Season. *Weather and Forecasting*, 14: 137-154
- DAS, SOMESHWAR, 2005. Mountain weather forecasting using MM5 modelling system. *Current Science* 88(6): 899- 905.
- FUENTES, V., A. Jazcilevich, R. Aguirre, A. Wellens, J. Aysa y C. Rivera. 1993. Modelo metropolitano de gestión de la calidad del aire. Reporte técnico, Dirección de Ecología, Gobierno del Distrito Federal. 100 p.

- GARCÍA, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Public. UNAM, 1973. 246 p.
- GARCÍA, R. J., 2002, Evaluación de escenarios utilizando el modelo regional de calidad del aire Multiscale Climate Chemistry Model, Tesis de doctorado, pos-grado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica de la UNAM, México. 55-56 pp.
- HERNÁNDEZ, G. R. 1999, Modelación preliminar del campo de viento alrededor de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. 67 p.
- INEGI, 2004. Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua. DVD, 350 pp.
- JAZCILEVICH, A., A. García and G. Ruiz-Suárez. 2002. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the region of Mexico. *Atmospheric Environment*, Vol. 37: 183-193 pp.
- KERBYSON, D.J., J. Kebin and K. Davis. 2007. Analysis of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model on Large-Scale Systems. In C. Bischof, M. Bücker, P. Gibbon, G.R. Joubert, T. Lippert, B. Mohr, F. Peters (Eds.), *Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications*, JNIC.
- KISLOVA, A.V., E.D. Babinab and V.V. Lbedeva. 2008. Evaluation of summer temperature and precipitation forecasts generated by the MM5 model over Central European Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 33 (7): 424-429.
- LOBATO, S., R. O. Rodríguez y I. Mendoza. 2005. Los usos de los modelos numéricos de mesoescala en México: un ejemplo de aplicación. *Revista Universitaria Digital*, 12 p.
- MAGAÑA, V., J. Pérez-Fernández and J. Méndez-Pérez. 2002. Diagnostic and prognostic of extreme precipitation events in the México basin. *Geofísica Internacional*, Vol. 41: 247-259 pp.
- MAGAÑA, V. 2004. Evaluación de modelos y construcción de capacidades para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático. 3er informe de proyecto CCA-UNAM-INE.
- MAYER, D.G. and D.G. Buttler. 1993. Statistical validation. *Ecol. Modelling*, 68: 21-32 pp.
- PÉREZ, F. J. 2004. Pronóstico numérico del tiempo para el Valle de México. Tesis de maestría. Centro de Estudios de la Atmósfera, Universidad Autónoma de México. México D.F. p. 69.
- REYES S., M.W. Douglas, R.A. Maddox, 1991. El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP). *Atmósfera* 7: 117-137.
- RICHARDSON, L. 1916. *Weather Prediction by numerical process* (Cambridge: Cambridge University Press. Vol 3. 234 p.
- SALAS, D., 2000, Experimentos numéricos de circulación atmosférica en el Valle de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México. 45 p.
- STAUFFER, D., and N. L. Seaman, 1990, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data, *Mon. Wea. Review*, Vol. 118, pp. 1250-1277.
- STERN, W., R. Pierrehumbert, J. Sirutis, J. Ploshay and K. Miyakoda, 1986, Recent Development in the GFDL Extended-Range Forecasting System, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction (Special Volume of the *Journal of the Meteorological Society of Japan*), Editado por T. Matsuno, 359- 363 pp.
- ZITÁCUARO, A. y E. N. Caetano. 2004. Simulación numérica de la circulación atmosférica en el Valle de México. 539-548 In García-Codron, J.C.; D. C. Liaño, F. A., P. Hernández, G. Pedraja, y R.D. Álvarez. *El Clima entre el mar y la montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander. Cantabria, España. Serie A, N° 4. 

Este artículo es citado así:

Reyes-Gómez V. M., D. Núñez-López, O. A. Viramontes-Olivas y V. D. Quiñonez-Quintana. 2010: *Aplicación y evaluación del modelo MM5 para pronóstico de lluvia y temperatura en Chihuahua, México*. *TECNOCENCIA Chihuahua* 4(1): 21-31.

Resúmenes curriculares de autor y coautores

VÍCTOR MANUEL REYES GÓMEZ. Egresó como biólogo de la ESB-UJED y como Maestro en Ciencias del Colegio de Posgraduados de Montecillos; obtuvo su DEA en Sciences de l'Eau Dans l'Environnement Continental en la Université de Montpellier II (1999, Francia) y el grado de doctor en ciencias de la Tierra y del Agua en la Université de Montpellier II (2002, Francia). Es investigador del Instituto de Ecología, A.C. (INECOL), adscrito al Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS), especialista en el área de hidro-edaforología y en el estudio de sequía y el monitoreo ecológico a largo plazo. Ha sido candidato del SNI (2004-2007), miembro de la Reseau de Zones Arides (1995-2005), miembro de la Comisión Scientiphique électoralle de l'IRD-Paris (2003-2005), director del CEISS (2003-2004), coordinador de investigación y docencia del CEISS (2004-2009). Ha publicado 10 artículos indexados, 1 libro y 8 capítulos de libro, ha dirigido 7 proyectos de investigación con fondos externos y participado en otros 7 en colaboración con otras instituciones, ha dirigido 5 tesis de licenciatura y 1 de doctorado. Ha participado en 15 ponencias por invitación y 30 en congresos y simposios nacionales e internacionales. Participó en docencia ofreciendo los cursos de: Manejo de Cuencas, Manejo Integral de los Recursos Naturales y Manejo Integral de Cuencas hidrográficas (UJED y UACH). Revisor de proyectos de CONACYT (Fondos Mixtos y Sectoriales, SINECYT), evaluador de artículos en revistas nacionales especializadas. Contacto: victor.reyes@inecol.edu.mx, rey.victor@gmail.com

DANIEL NÚÑEZ LÓPEZ. Egresado de la Licenciatura en Ciencias Forestales de la Universidad Juárez del Estado de Durango, con estudios de Maestría en Ciencias Forestales cursados en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Especialista en el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica y de Teledetección orientado a la evaluación de recursos naturales. Incorporado desde el año 2001 en el Centro de Investigación Sobre Sequía del Instituto de Ecología A.C. (CEISS-INECOL) desarrollando proyectos de investigación relacionados con incendios forestales en donde generó un modelo cartográfico para identificar el riesgo potencial de incendios forestales en Chihuahua, así mismo contribuyó en la implementación de un sistema de monitoreo de la sequía en el norte de México. Es autor y coautor de artículos científicos indexados, así como de capítulos de libros; ha dirigido varias tesis de licenciatura. Ha participado como especialista invitado en ponencias nacionales e internacionales relacionadas a sequía e incendios forestales. Actualmente es estudiante del programa de Doctorado en Ciencias con especialidad en Manejo de Recursos Naturales en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS. Realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua, obteniendo el título de Ingeniero Zootecnista (1981-1985). Cursó la maestría en Producción Animal, en el área de Reproducción y Genética Animal (1991-1993), en la misma institución con mención honorífica. Obtuvo su Doctorado por el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) de 2005 a 2008, con el tema de Disertación «Evaluación de las Propiedades Hidráulicas del Suelo Superficial Aplicando un Modelo de Escurrimiento en la Cuenca del Río Conchos» con mención honorífica. Laboró en el periodo 1986-1995 en la Facultad de Medicina de la UACH, como jefe del Departamento de Animales de Investigación. Ingresó a la Facultad de Zootecnia y Ecología de 1995 a la fecha en diversas áreas (Extensión y Difusión, Planeación, Reproducción y Genética y actualmente en Recursos Naturales y Ecología). Tiene un amplio trabajo editorial en diferentes medios de comunicación (Heraldo de Chihuahua, Norte de Chihuahua, revista el Pueblo de Chihuahua, Chihuahua Moderno, La Opción, NN Noticias en Radiorama de Chihuahua) y revistas científicas arbitradas e indexadas, sobre temas relacionados con el manejo de cuencas y agua. Autor de los libros La Rabia y el Manual para Determinar Erosión del Suelo a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, Aplicando Tecnología Geoespacial. Colaborador de los cuerpos académicos de Agua y Suelo, en el Instituto de Ciencias Agrícolas de la UABC y el CA-105 y CA-16 en la Facultad de Zootecnia y Ecología de la UACH. Ha sido ponente en varios congresos nacionales e internacionales, con temas relacionados con conservación de cuencas y la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

VÍCTOR DIEGO QUIÑÓNEZ QUINTANA. Egresó de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua, como ingeniero en Ecología en el año 2010. Realizó su investigación de tesis de ingeniería en el tema de pronóstico de lluvia y temperatura en Chihuahua, usando el modelo de mesoescala MM5; ha participado como Técnico de Servicios Profesionales en el área de incendios forestales de la Región VI Río Bravo de CONAFOR; también, como Técnico de la Red LTER de México en el área de tratamiento de datos climáticos y como Técnico en el tratamiento de cartografía de sequía en la Región VI Río Bravo, en el marco del proyecto CNA-CONACYT «Implementación de un sistema de Monitoreo de sequías para la RVI del Río Bravo. Tiene participaciones en congresos nacionales e internacionales sobre Ciencias Ambientales, Ecología y productos biotecnológicos.