Introducción

La década de los noventa fue una de las más cálidas desde que se tienen registros instrumentales. Se caracterizó por un número elevado de desastres asociados a lluvias torrenciales e inundaciones que provocaron cuantiosas pérdidas en el mundo, tanto materiales como de vidas humanas. Es por ello que los desastres asociados a hidrometeoros se han convertido en uno de los temas de mas relevancia en las agendas de política pública, pues la combinación del incremento de los asentamientos humanos irregulares con eventos hidrometeorológicos extremos ha elevado el riesgo para la población. En la Ciudad de México, los fenómenos hidrometeorológicos son los que causan mayores pérdidas, tanto económicas como humanas (GDF, 2000). Tal situación podría empeorar de no tomarse medidas preventivas estructurales, pues el número de eventos hidrometeorológicos extremos en las últimas décadas ha ido en aumento (Jáuregui, 2000).

Los procedimientos operativos de prevención y atención de situaciones de desastre en temporada de lluvias se ven en ocasiones limitados por factores técnicos y presupuestales. En el caso del problema técnico, este se relaciona a la poca o nula confianza de las autoridades sobre la información meteorológica, por lo que un pronóstico del tiempo rara vez apoya en la toma de decisiones. Esto es en realidad un problema de capacidad y conocimiento. Por lo anterior, la mayor parte del tiempo se trabaja en la atención de la emergencia más que en acciones preventivas. Por desconocimiento o conveniencia, muchos hablan de que las lluvias intensas son fenómenos impredecibles. Sin embargo, en muchos países, la situación es distinta, pues el pronóstico del tiempo es un elemento esencial de las actividades de protección civil.

En la actualidad, tanto el Servicio Meteorológico Nacional como algunas universidades dedicadas a la investigación en Meteorología hacen uso de modelos de pronóstico numérico del tiempo para generar información meteorológica. Los modelos son capaces de simular la dinámica atmosférica de mesoescala de una región en particular, incluyendo aspectos del ciclo diurno, de la circulación de vientos superficiales, de las lluvias e incluso de algunos eventos hidrometeorológicos extremos. A pesar de que los modelos tienen aciertos en pronósticos de lluvia y temperatura a escala sinóptica, existen algunas limitaciones cuando

se trata de predicciones locales. Esto es, al aumentar la resolución espacial algunas parametrizaciones físicas dejan de ser válidas. Por ello, los pronósticos locales del tiempo en zonas tropicales con accidentes orográficos, como los de nuestro país, resultan un verdadero reto. Pero, ¿hasta qué punto se puede reducir la escala espacial de un pronóstico manteniendo un adecuado nivel de acierto?

Definir límites en la resolución espacial y en el tiempo de pronóstico de forma tal que éstos sean útiles en sectores como protección civil, es de fundamental importancia. Las predicciones meteorológicas poseen un gran valor cuando se conoce el peso que se le puede dar en la toma de decisiones.

El presente trabajo analiza este problema de forma objetiva, definiendo esquemas de verificación de la calidad del pronóstico numérico de mesoescala para la Cuenca de México, con el fin de que en centros operativos se determine la confianza que en ellos pueden tener.

Objetivo del estudio

El objetivo de este trabajo es de evaluar objetivamente las predicciones numéricas a 24 horas de condiciones de tiempo meteorológico, esto es, precipitación, temperatura y viento en superficie sobre la Cuenca de México. Las evaluaciones permitirán definir algunas características de un modelo de mesoescala cuando se usa de forma operativa. Por ejemplo, una evaluación sistemática de las predicciones permitirá:

- Definir la máxima resolución espacial con la que es posible obtener predicciones del tiempo útiles.
- Conocer los errores sistemáticos de dichos pronósticos para corregirlos o eliminarlos, y
- Analizar el potencial de un modelo de mesoescala para pronosticar eventos extremos de precipitación.

Las respuestas a los planteamientos anteriores sentarán las bases para que el pronóstico operativo del tiempo pueda ser implementado y utilizado como una herramienta de planeación y prevención de desastres en la Cuenca de México.

El presente estudio está estructurado de la siguiente forma: en el capítulo 1 se mencionan los antecedentes relacionados con el trabajo de investigación. En el capítulo 2 se describen los datos y la metodología utilizados en el estudio. En el capítulo 3 se analizan las lluvias en el Valle de México, así como sus variaciones espaciales y temporales. La discusión de los resultados sobre la evaluación del pronóstico se da en el capítulo 4. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo con énfasis en la relevancia de predicciones del tiempo para las actividades relacionadas con la protección civil.

Capítulo I

Eventos hidrometeorológicos extremos en la Cuenca de México

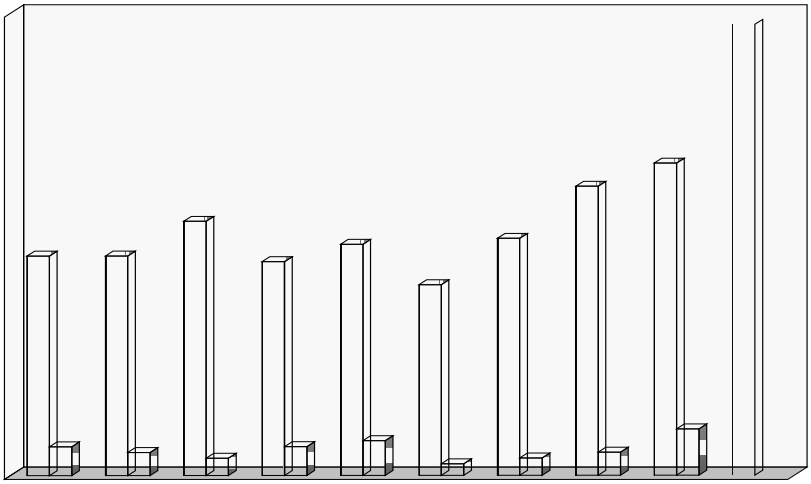
1.1 ¿Qué es un desastre?

En las ciencias naturales, los desastres son considerados como el fenómeno, repentino o progresivo, que afecta al medio ambiente y a la sociedad, la cual tiene que reaccionar con medidas extraordinarias (Ortíz y Oropeza, 1992). Otros, hablan de desastre como la materialización del riesgo (Rodriguez, 1999). Los fenómenos de tipo hidrometeorológico intensos que potencialmente son más desastrosos incluyen:

- ciclones tropicales
- lluvias torrenciales, trombas o aguaceros
- nevadas, granizadas o heladas atípicas
- inundaciones
- sequías

Según Maskey (1989), el riesgo se puede definir como una combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad. Así, el riesgo corresponde a la probabilidad de que una amenaza provoque efectos potencialmente desastrosos que afecten a la sociedad. Estos efectos dependerán principalmente del grado de vulnerabilidad, que es la incapacidad de una sociedad de soportar la ocurrencia de fenómenos peligrosos (Rodriguez, 1999). La vulnerabilidad depende principalmente de factores sociales, económicos, culturales o políticos.

En el mundo, el número de desastres, principalmente de tipo hidrometeorológico ha crecido en los últimos años (Fig. 1), por lo que la Organización de las Naciones Unidas declaró la década de los 90 como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres. La ocurrencia en años recientes de deslaves, inundaciones, lluvias intensas y granizadas, es más frecuente y costosa que las que se tienen de otros fenómenos geofísicos.



abril o mayo. En años recientes, se han alcanzado temperaturas máximas superiores a los 35° C, quizás como señal de un calentamiento global.

El régimen de lluvia característico de la región de la Cuenca de México, exhibe un comportamiento del tipo monzónico con una temporada de lluvias de verano bien definida entre mayo y septiembre. En invierno, entre noviembre y abril aparece una temporada de secas. En esta temporada sólo se presentan lluvias esporádicas relacionadas con el paso de frentes fríos o *nortes* (Vázquez, 2000). En comparación con la zona norte y oriente de la Ciudad, las zonas sur y suroeste presentan tanto el mayor número de días con lluvias (alrededor de 110 días) como la mayor cantidad de lluvia acumulada (~ 900 mm/año) (Fig. 5). Las montañas del poniente y sur de la Ciudad, en combinación con el flujo de humedad provocan que, además de tener el mayor número de días con lluvias, también se presenten mas aguaceros (> 20 mm/hr).

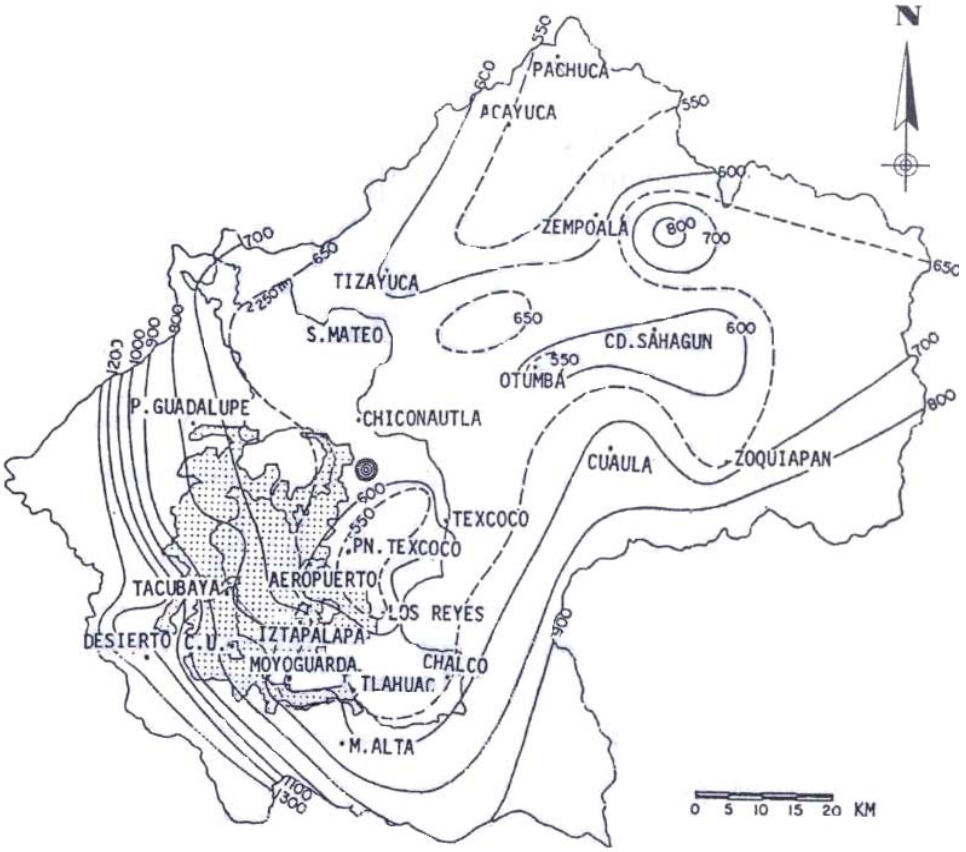


Fig. 5 Precipitación media anual en la Cuenca de México. Periodo: 1941-1995.
(Tomada de Jáuregui, 2000)

1.2.1. Eventos de lluvia intensa.

Durante el periodo de las lluvias de verano se presentan aguaceros (precipitación › 20 mm/hr), los cuales ocurren con mayor frecuencia durante la tarde o noche. Se ha encontrado que en la parte oeste y suroeste de la Ciudad hay un aumento en el número de aguaceros en décadas recientes (Fig. 6) (Jáuregui y Romales, 1996), es decir, hay una tendencia al aumento de eventos de precipitación extrema o intensa.

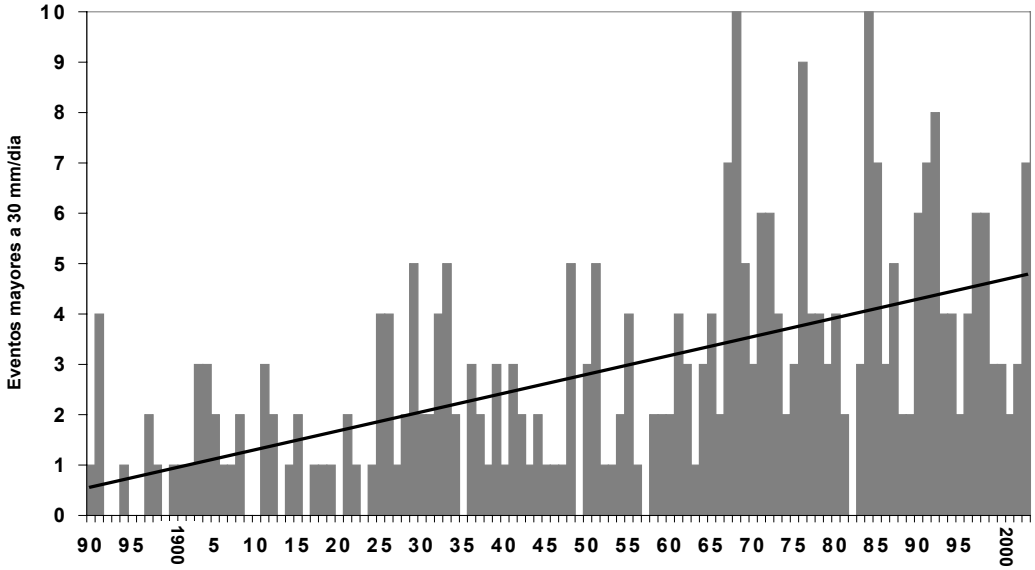


Fig. 6 eventos de precipitación en 24 horas mayores a 30 mm. en la estación Tacubaya. Periodo: 1890-2003.

Estadísticamente, un evento de precipitación extrema se define como aquellos casos lo suficientemente improbables de ocurrir. Al analizar la función de distribución de probabilidad de la lluvia en 24 hrs, mediante la distribución Gamma, el 90 % de la probabilidad puede ser considerada como casos de lluvia normal, y sólo el 10% restante corresponde a eventos de precipitación extrema (Fig. 7) (Magaña, et al., 2002).

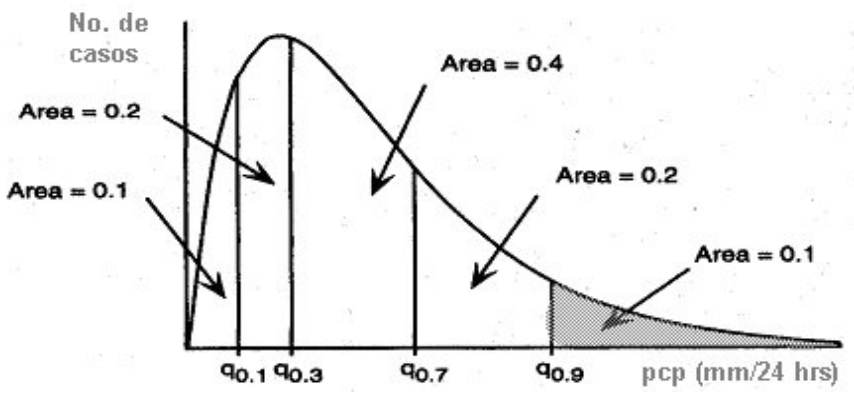


Fig. 7 Distribución Gamma para lluvia acumulada en 24 hrs. La región sombreada (q) corresponde al 10 % de probabilidad y denota un evento de lluvia extrema.

1.3 Los modelos númericos en la Meteorología

La idea del pronóstico numérico del tiempo surgió a principios del siglo XX (Richardson, 1916). Sin embargo, los modelos numéricos lograron ser prácticos sólo hasta la segunda mitad del siglo XX (Charney et al, 1950) gracias al desarrollo de la computación que permitió reducir los tiempos de procesamiento y mejoras en sus resultados (Fig. 8) (Bushby, 1986). Los esquemas numéricos de los modelos, sus parametrizaciones y la visualización de los resultados han mejorado notablemente en la última década, lo que permite convertir los pronósticos en verdadera información para los tomadores de decisiones.

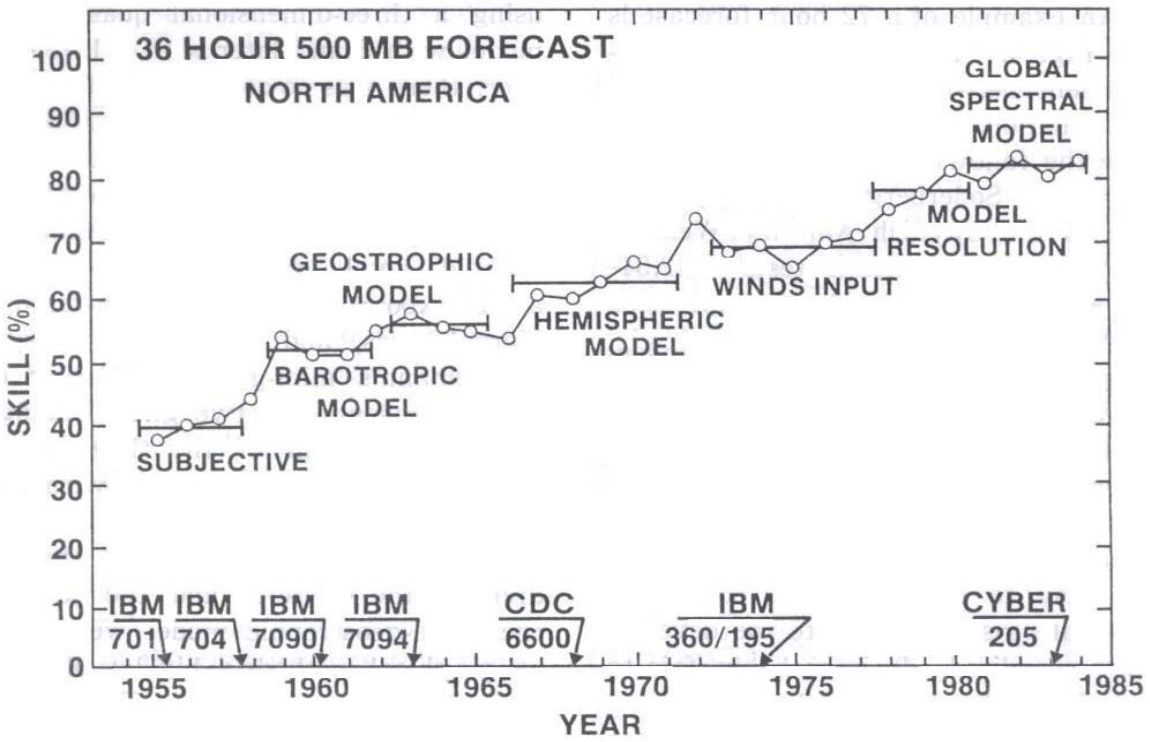


Fig. 8 Calidad del pronóstico del campo de geopotencial al nivel de 500 milibares a 36 horas como función del tiempo, para Estados Unidos. (Tomado de Bushby, 1986)

En las últimas décadas, la capacidad del pronóstico del tiempo ha avanzado hasta permitir simular la circulación atmosférica de mesoescala o regional. Los desarrollos y adecuaciones sobre los modelos numéricos han sido enfocados a la creación de Modelos Atmosféricos de

Área Limitada (LAM, por sus siglas en inglés) (Stauffer y Seaman, 1990). A diferencia de los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés), los LAM consideran sólo una subregión del globo para simulaciones de tiempo y clima. Estos modelos incluyen los esquemas más sofisticados de la física atmosférica, y son capaces de generar circulaciones atmosféricas por forzamientos termodinámicos y dinámicos asociados al uso de suelo y a la orografía.

Los modelos más sofisticados distan de ser perfectos, principalmente cuando la escala espacial a utilizar se reduce y las parametrizaciones de nubes dejan de ser válidas, llevando a errores en pronósticos de la cantidad de precipitación (Stern et. al, 1986). Es este parámetro meteorológico el que es más relevante en lo que se refiere a predicción del tiempo a escala local.

1.3.1 Algunas técnicas de evaluación utilizadas

Desde las primeras simulaciones y pronósticos numéricos de la circulación de la atmósfera y del tiempo meteorológico se ha trabajado en la evaluación de los resultados usando distintas metodologías. La comparación con campos observados es la única forma de medir la calidad de un modelo. Dicha evaluación puede ser cualitativa o cuantitativa (Wilks, 1995). La primera está basada en el análisis de gráficas, mapas de contornos y diagramas. La segunda opción utiliza índices estadísticos para comparar similitud entre campos y es la herramienta más utilizada por la comunidad meteorológica, tanto científica como operativa. Ejemplos de tales índices son el error cuadrático medio, las medias móviles y la desviación estándar.

En los primeros pronósticos del tiempo se utilizaron reportes locales y cartas sinópticas para la evaluación puntual de campos de viento, temperatura y altura geopotencial (Charney et al., 1950; Saucier, 1955). En principio, la comparación de patrones era difícil por la falta de observaciones en todo el dominio de interés. Sin embargo, a partir de la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de conocer el estado futuro de la atmósfera obligó a realizar más mediciones meteorológicas que permitieran analizar las condiciones

sinópticas en una región. El primer intento de realizar un análisis objetivo fue hecho por Panosfky (1949) para el campo de altura geopotencial a 700 mb. Sin embargo, no fue sino hasta el trabajo realizado por Gilcrhist y Cressman (1954), basado en expansiones polinomiales, que se logró generar un campo observado en una malla regular que permitiera comparar observaciones y pronósticos.

Mediante el análisis objetivo[1], la calidad de los datos puede ser evaluada automáticamente. Desde entonces, los esquemas de análisis objetivo considerados como referencia para una mejor calidad de los pronósticos numéricos fueron utilizados operativamente en el National Weather Service de los Estados Unidos. Dicho procedimiento permitió determinar y corregir errores sistemáticos con esquemas como el de pronóstico perfecto o *Perfect Prog* (Klein, 1971), o por medio de estadísticas (diarias, semanales, mensuales, estacionales o anuales) de las salidas de los modelos (*MOS*[2], por sus siglas en inglés) (Glahn y Lowry, 1972). Hoy se sabe que la asimilación de los datos meteorológicos en las condiciones iniciales reduce substancialmente la magnitud de los errores sistemáticos en los pronósticos meteorológicos (Kitade et al., 1987; Bushby, 1987). Sin embargo, el pronóstico de la precipitación sigue siendo un reto.

El modelo de mesoescala versión 5 (MM5) ha sido parte de las herramientas para el pronóstico meteorológico tanto en los Estados Unidos como en otros países del mundo (Grell et al., 1994). Es por ello el interés de muchos meteorólogos de evaluar al MM5 mediante técnicas estadísticas y comparaciones sistemáticas para ver su desempeño en simulaciones de campos de temperatura, humedad (Stensrud y Skindlov, 1996) y patrones de viento (Seaman y Michelson, 2000). En comparaciones recientes con otros modelos tipo LAM, se encontró que el MM5 sobreestima entre 2 y 3 ms^{-1} la intensidad del viento (Shafran et al, 2000; Cox, et al, 1998) y, con un margen de error de entre 50° y 60°, la dirección del viento en terrenos llanos de la parte noreste de los Estados Unidos, pudiéndose duplicar el error en superficies con accidentes orográficos cuando no se cuenta

[1] Procedimiento operativo mediante el cual se construye un campo meteorológico en una malla regular a partir de las observaciones en puntos distribuídos aleatóriamente.
[2] Model output statictic o MOS es un esquema de generación de valores de predicción de variables meteorológicas en el que los errores sistemáticos del modelo son evaluados y corregidos a la hora de emitir valores puntuales para algún sitio en particular.

con una buena representación de la superficie (Hanna y Yang, 2001). En términos generales, para la temperatura el MM5 muestra que los valores tanto máximos como mínimos simulados en superficies llanas tienden a ser subestimados alrededor de 2° C (White et al., 1999; Cox. et al, 1998), dando lugar a que durante la noche la capa de mezcla no sea bien simulada y lleve a errores en la simulación de dispersión de contaminantes (Hanna y Yang, 2001). El MM5 es considerado por la comunidad meteorológica lo suficientemente robusto, en términos de la física que contiene, para su aplicación en la predicción del tiempo (White et al., 1999).

Para el caso de México, el *MM5* ha sido utilizado para simular o predecir circulaciones atmosféricas a nivel regional (Pérez, 1997; 2001) y campos de viento superficial y de altura geopotencial (Hernández, 1999), y 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 del pronóstico operativo del tiempo meteorológico en México (Magaña y Pérez, 1998). 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. Tal determinación requerirá analizar los errores sistemáticos que presenta el modelo, especialmente en lo que se prefiere a pronóstico de eventos de lluvia intensos, en plazos de 24 y 48 horas.

En este trabajo, se aborda el problema descrito estudiando la región de la Cuenca de México. Mediante técnicas estadísticas similares a las utilizadas en trabajos citados anteriormente, se analiza la confianza de las simulaciones obtenidas del MM5, con la finalidad de estimar los errores sistemáticos que el MM5 presenta.