

EL PRONÓSTICO DE LLUVIAS INTENSAS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

Víctor Magaña*, Luis Clemente López
y Gustavo Vázquez

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad
Universitaria, C.P. 04510, Deleg. Coyoacán, México, D.F. E-mail: *victormr@unam.mx

RESUMEN

El pronóstico numérico del tiempo se ha vuelto una herramienta fundamental en las instituciones de Protección Civil. Sin embargo, en el caso de los pronósticos de corto plazo para el Valle de México, es relativamente poco lo que se conoce sobre la calidad de las predicciones. Mediante datos diarios de precipitación observada y pronosticada con el modelo de mesoescala conocido como MM5 se hace una evaluación de los pronósticos de lluvia. Se encuentra que cuando se hacen predicciones de alta resolución espacial en el Valle de México, donde los efectos de la urbanización y la orografía son importantes, la calidad de los pronósticos de lluvia es limitada, con patrones espaciales observados y pronosticados diferentes. La falta de coherencia espacial entre predicciones y observaciones requiere comenzar por analizar los factores físicos estacionarios que pueden influir en la calidad de las predicciones. Los errores en los pronósticos a corto plazo requieren por tanto formular estrategias de gestión de riesgo para implementar acciones de prevención de desastres.

Palabras Clave: Errores sistemáticos, gestión de riesgo, pronóstico del tiempo, tiempo severo.

ABSTRACT

Numerical Weather Prediction has become a fundamental tool in Civil Protection Institutions. Short term numerical weather prediction for the Valley of Mexico has rarely been evaluated in a systematic way. By using daily observed precipitation data and those predicted with the mesoscale model known as MM5, an evaluation of rainfall forecast is made. It is found that making predictions of high spatial resolution in the Valley of Mexico is of limited quality mainly because of the effects of urbanization and orography over the rainfall. The lack of consistency between predicted and observed rainfall spatial patterns requires an analysis of stationary physical factors that can influence the quality of forecasts. Errors in short term forecasts require risk management strategies to implement disaster prevention actions.

Key Words: Systematic errors, risk management, weather, severe weather.

INTRODUCCIÓN

El ser humano se encuentra expuesto a fenómenos atmosféricos que representan un riesgo para su bienestar y entorno. Con describir la ocurrencia de estos fenómenos no satisface su deseo de entender el por qué. Durante el siglo XX, el estudio para la comprensión de fenómenos atmosféricos, impulsó áreas como el pronóstico numérico del tiempo llevando al desarrollo de modelos de

predicción atmosférica que son una herramienta básica para estudiar la dinámica de los fenómenos atmosféricos.

En el mundo, existe un gran interés por obtener pronósticos de tiempo severo para poder implementar acciones preventivas que reduzcan los impactos de fenómenos como tormentas intensas, ondas de calor o de frío, o rachas de viento fuertes. Cada vez es más claro que no basta con hablar de temperaturas mínimas y máximas, o probabilidades de lluvia, pues en su forma actual no permiten estructurar acciones en materia de Protección Civil. Para llegar a predicciones del tiempo más precisas es

necesario establecer cuál es la capacidad actual de pronóstico con que se cuenta. En regiones como el Valle de México, el pronosticar eventos meteorológicos extremos es un reto singular, pues además de tratarse de una atmósfera con características tropicales, está rodeada de montañas que imprimen una complejidad substancial.

Realizar un pronóstico numérico del tiempo en forma determinística depende de establecer la mejor condición inicial del estado de la atmósfera para poder inicializar el modelo. "Conociendo la mejor condición inicial del estado de la atmósfera, se pueden resolver las ecuaciones para obtener nuevos valores de las variables involucradas para un tiempo futuro"¹. Pero, conocer el estado "verdadero" de la atmósfera es imposible porque aunque se tuvieran instrumentos de medición con incertidumbre nula, la cobertura espacial no permitiría obtener datos en todo el dominio atmosférico. Es por ello que se han desarrollado algoritmos para generar estimaciones del estado de la atmósfera con mayor precisión a partir de información satelital, radiosondeos, datos de estaciones de superficie, aviones meteorológicos, etc.

En Meteorología se ha trabajado desde hace algunos años en el desarrollo de esquemas de análisis objetivo e inicialización de los modelos numéricos de pronóstico del tiempo. La diferencia en la calidad de los pronósticos es notable cuando se corrigen las condiciones iniciales. Sin embargo, esto no es suficiente para garantizar predicciones del tiempo suficientemente precisas, pues la compleja dinámica de la atmósfera a nivel de mesoescala se aproxima con frecuencia a los retos del estudio de procesos turbulentos. Los modelos regionales, también conocidos como modelos de área limitada, fueron creados para comprender procesos físicos a escalas locales. Se caracterizan por tener condiciones de frontera bien definidas y son capaces de simular la dinámica de la atmósfera en resoluciones espaciales muy altas (unos cuantos kilómetros). A pesar de su resolución espacial, los modelos consideran parametrizaciones para describir en forma implícita procesos como la formación de nubes o la dinámica de la capa límite planetaria.

Contar con pronósticos de tiempo de mayor precisión en el Distrito Federal se ha vuelto una necesidad, pues existe una tendencia a eventos extremos de lluvia, y de mayor intensidad y frecuencia^{2,3}. Si se desea actuar preventivamente frente al riesgo, el pronóstico resulta esencial. Aunque se han utilizado diversos esquemas de pronóstico para México, ninguno ha realizado pruebas de calidad que generen confianza entre los usuarios de la información. Con frecuencia, los grupos que usan modelos como el MM5, WRF, etc., en pronósticos de tiempo se limitan a presentar los resultados y en el mejor de los casos a realizar una evaluación visual subjetiva.

OBJETIVO

Este trabajo tiene como objetivo analizar los resultados de varios años de pronóstico numérico del tiempo a nivel de mesoescala,

específicamente para precipitación acumulada a 24 horas en el Distrito Federal de forma que se puedan plantear cuáles son sus alcances y limitaciones, y se analice la importancia de avanzar en medidas de prevención ante tiempo severo y bajo un esquema de gestión de riesgo.

DATOS Y METODOLOGÍA

a) Datos observados

Un elemento fundamental para el análisis y evaluación de pronóstico numérico del tiempo es contar con información adecuada de observaciones. La información de tiempo atmosférico proviene de diversas fuentes y bases, entre las que se encuentran redes de estaciones meteorológicas de superficie, radiosondeos, informes meteorológicos aeronáuticos (METAR), estimaciones de satélite e información de mediciones verticales (perfiladores atmosféricos). En la práctica, mucha de esta información distribuida aleatoriamente, es integrada en bases de datos para ser llevada a mallas regulares, mediante técnicas conocidas como análisis objetivo.

El Distrito Federal cuenta con redes de observación adecuadas para caracterizar variables meteorológicas con alta resolución espacial y temporal. La integración de la información del sistema de pluviómetros automáticos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), las redes de estaciones en superficie y radiosondeos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU) y los METARES del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), han permitido describir y analizar en escala temporal-espacial alta la dinámica de las condiciones meteorológicas para el Distrito Federal.

Se cuenta además con estimaciones de lluvia en todo el mundo, construidas a partir de información satelital conocida como CMORPH⁴. La información recabada por los satélites permite determinar la estructura, evolución y temperatura del tope de cuerpos de nubes. El algoritmo hace un análisis retrospectivo para determinar coherencia y consistencia en las estimaciones de precipitación, la resolución del primer producto derivado del algoritmo es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, mientras que los productos de resolución más alta son obtenidos a partir de una interpolación. Por la cantidad de estaciones disponibles es factible usar una resolución aproximada de $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ en el análisis final; el dominio fue determinado en función de la distribución espacial de las estaciones. Las bases de datos en malla regular se construyen mediante un proceso de interpolación que utiliza datos de estaciones distribuidas irregularmente en forma de malla, mediante el método de asimilación de datos, conocido como esquema de análisis objetivo por correcciones sucesivas⁵.

b) Modelo numérico

A diferencia de los procesos de escala sinóptica que están asociados a longitudes de onda mayor a miles de kilómetros y

persistencia de días hasta semanas, la mesoescala presenta estructuras de dimensiones pequeñas y de duración que va de los minutos hasta días. Realizar pronóstico numérico de variables como temperatura, precipitación, viento y humedad relativa, en escalas menores a 20 km, obliga a trabajar en la mesoescala (Tabla I) analizando la dinámica de las tormentas en la región de estudio, el comportamiento de parámetros que detonan la convección, flujos de calor, humedad en la superficie y en distintos niveles de la atmósfera, el comportamiento de la turbulencia. Existen forzantes de impacto llamados parámetros estáticos como la topografía o el uso de suelo que determinan en gran medida las condiciones de mesoescala. Por ejemplo, el Distrito Federal presenta una orografía compleja y el uso de suelo ha sido modificado de forma acelerada desde la mitad del siglo pasado, lo que ha provocado un cambio en la dinámica de la atmósfera.

Nombre	Dimensiones [km]	Tiempo
Mesoescala - alfa	200-2000	6 h a 2 días
Mesoescala - beta	20-200	30 min a 6 h
Mesoescala - gamma	2-20	3 min a 30 min

Tabla I. Clasificación mesoescala (Orlasnki, 1975)⁶.

El modelo de mesoescala conocido como MM5⁷, fue desarrollado originalmente en la Universidad de Pennsylvania y se ha enriquecido con el tiempo por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos. El sistema de modelación MM5 está constituido por módulos de pre-procesamiento y post-procesamiento de la información. La ventaja de usar el MM5 es que permite realizar diversas configuraciones entre los módulos, dependiendo de las necesidades del usuario y el diseño del experimento. Como todo modelo sólo ofrece una descripción aproximada de la realidad, y por ello tiene alcances y limitaciones que es necesario identificar.

c) Evaluación

Conocer la calidad de los productos ha permitido convertir el pronóstico en una poderosa herramienta de investigación y en algunos casos, es usado para la toma de decisiones. Pero saber cuándo un modelo está generando resultados correctos requiere pasar por una serie de etapas, partiendo de estar conscientes que los modelos generan aproximaciones del estado de la atmósfera y son susceptibles a errores de condición inicial y configuración. Lo anterior se reflejará en la habilidad de los modelos para resolver situaciones asociadas a fenómenos de escala sinóptica o de mesoescala que lleva a tiempo severo local.

Los métodos de evaluación han evolucionado desde simples comparaciones visuales hasta esquemas complejos como el pronóstico cuantitativo de la precipitación⁸, por la necesidad de conocer a más detalle la eficiencia de los modelos. Por ello, se debe ir más allá de las medidas tradicionales como: la media, error

cuadrático medio (ECM), coeficientes de correlación para analizar formas de variabilidad de los resultados y las observaciones. Lo anterior no quiere decir que dichas métricas del error no sean útiles, pero la información obtenida de ellas no siempre permite tener una visión íntegra del problema de pronóstico.

La forma de verificación más sencilla de un pronóstico es comparar de forma visual las salidas del modelo con los campos observados. La comparación puede ser hecha incluso confrontando valores puntuales, con información de estaciones meteorológicas en superficie. La verificación visual, sin embargo, no es una medida cuantitativa de la habilidad del modelo, porque es susceptible de sesgos de interpretación por parte del observador. Además, es una técnica muy lenta porque es necesario contar con una base de datos lo suficientemente robusta para determinar la habilidad del modelo.

Por ello, los modelos también se verifican cuantitativamente mediante tablas de contingencia, por ejemplo cuando se trata de evaluar la habilidad de un modelo del tiempo en pronosticar condiciones particulares⁹, que generalmente corresponde a eventos de tiempo severo. Considerando la frecuencia de ocurrencia de cada una de las categorías establecidas, los resultados pueden agruparse dependiendo de la característica meteorológica a pronosticar. Es posible analizar los patrones espaciales observados y pronosticados que ocurren con mayor frecuencia como una forma de establecer los sesgos en los modelos, este análisis se puede hacer mediante el uso de funciones empíricas ortogonales.

RESULTADOS

La precipitación en el Distrito Federal (D.F.) ocurre principalmente en los meses de verano, y el ciclo inicia en el mes de mayo, terminando en el mes de octubre. La precipitación del verano en el Valle de México está modulada en gran medida por el paso de ondas del este, que aportan un flujo de humedad del Golfo de México. El efecto orográfico de las montañas del poniente refuerza los movimientos ascendentes y con ello, la intensidad de la precipitación hacia esa zona. De acuerdo con Jáuregui (2000)² y Pérez (2004)⁹, ha habido un incremento de precipitación extrema en las últimas décadas en la estación de Tacubaya (Fig. 1) y en gran parte del Distrito Federal.

Los resultados del análisis muestran que las lluvias intensas, por ejemplo de más de 20 mm/hora, ocurren principalmente en el poniente del Valle de México alrededor de veinte veces por año (Fig. 2), debido a los efectos orográficos del poniente, pero en parte por la distribución del flujo de humedad cerca de la superficie. El número de eventos de lluvia intensa varía de un año a otro y esto determina una buena o mala temporada de lluvias, pero también el número de impactos negativos por encharcamientos o inundaciones. Aunque se sabe que la presencia de una onda del este favorece la ocurrencia de un evento de lluvia intensa en el Valle de México, el poder definir las

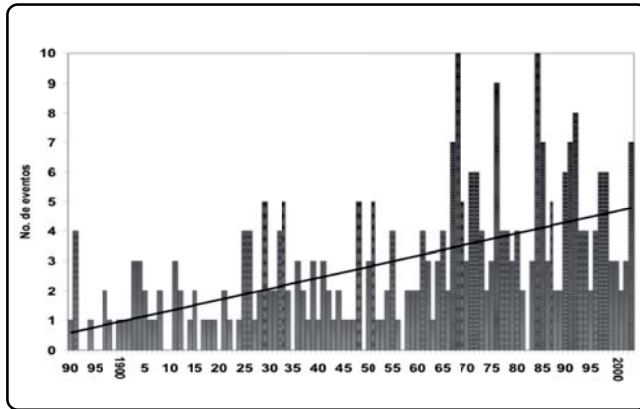


Figura 1. Número de eventos extremos de precipitación (lluvias mayores a 20 mm/día) en la estación de Tacubaya entre 1890-2003. La línea corresponde a la tendencia lineal.

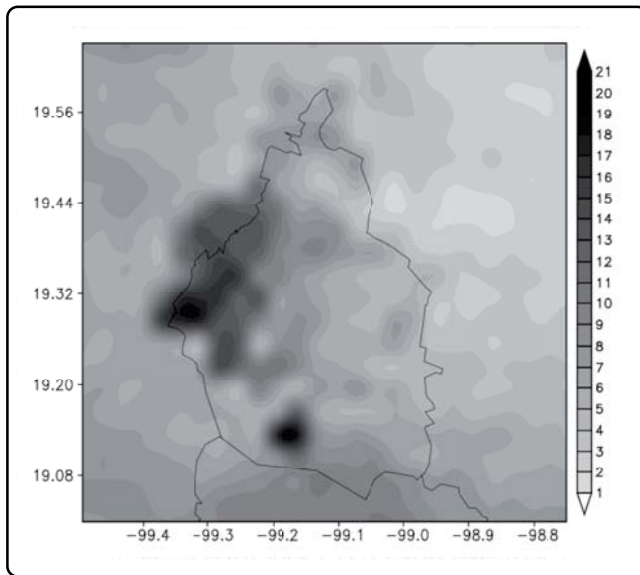


Figura 2. Número de eventos de precipitación mayores a 20 mm/h sobre el Distrito Federal en el periodo de 2003-2010.

características espaciales del evento en un modelo de pronóstico no ha sido tarea fácil.

Modelar la variable de precipitación es lo más complejo por todos los procesos de mesoescala involucrados. En el Distrito Federal plantea un reto en primera instancia por la ubicación geográfica, donde los efectos orográficos son de importancia y, por otra parte, por los parámetros relacionados con la urbanización, resultado de cambios en balances radiativos locales que determinan la estabilidad atmosférica. En particular, la interacción del flujo de humedad del este con las montañas como el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl es clave en la distribución de la precipitación sobre el Valle de México.

Mediante una comparación visual basada en contraste de la media mensual pronosticada y observada, construidas a partir de predicciones de tiempo diarias (Fig. 3), para el periodo de 2008-2010, se encuentran marcadas diferencias entre ambos. Mientras que en el sur y suroeste de la ciudad la lluvia es sobrestimada. En particular, la zona poniente y oriente, donde la precipitación es más abundante muestra que el modelo subestima la lluvia.

Establecer las fuentes de error en el modelo no es un problema trivial, y se pueden dividir en dos categorías: la primera, relacionada con parámetros estáticos determinantes como la topografía y el uso de suelo. La segunda categoría está relacionada con aspectos dinámicos que dan origen al tiempo atmosférico en la región (e.g. inestabilidades) y que pueden estar relacionados con la condición inicial, con la forma en que se configura el modelo y un conocimiento incompleto de los fenómenos.

Una estrategia para mejorar la habilidad del modelo, principalmente en el pronóstico de precipitación, es realizar una serie de experimentos de sensibilidad que involucre a la componente orográfica y el uso de suelo, modificando y actualizando en su caso cada uno de estos parámetros. Las primeras pruebas en este sentido, sin embargo, no parecen cambiar las estadísticas de los errores en los patrones, por lo que se tendrá que trabajar en otros aspectos.

Por ejemplo, bajo consideraciones de tipo termodinámico, a mayor temperatura aumenta la capacidad de la atmósfera de contener vapor de agua, por lo que la cantidad de agua precipitable y humedad específica son mayores. Es posible que el cambio de uso de suelo experimentado en el Distrito Federal en los últimos cien años, aproximadamente, haya llevado a un calentamiento más intenso de la superficie, por lo que las condiciones atmosféricas se vuelven más inestables incrementando el potencial de tormentas más intensas^{3,10}. Este hecho cambia la condición no sólo en superficie, sino en toda la atmósfera, razón por la cual se deberá pensar en mejorar la condición inicial no sólo en superficie, sino también en altura. Mejorar la condición inicial en los modelos requerirá mejorar los sistemas de observación en altura sobre el Valle de México.

Una forma de comparar no sólo los valores medios, sino también los patrones dominantes de variabilidad, es a través de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs). En el contraste entre los modos de variabilidad (EOFs) de las observaciones con los del modelo (Fig. 4), se encuentran grandes diferencias del EOF1 observado y modelado, aunque la varianza explicada total es del mismo orden (alrededor del 30%). El EOF1 observado presenta un máximo hacia el poniente de la ciudad (Fig. 4a). La diferencia radica en el EOF1 del modelo que muestra una forma de "herradura" en la región centro-poniente del Distrito Federal con valores máximos hacia el sur, cerca del estado de Morelos. En el caso del EOF2 el modelo es capaz de capturar el modo de variabilidad

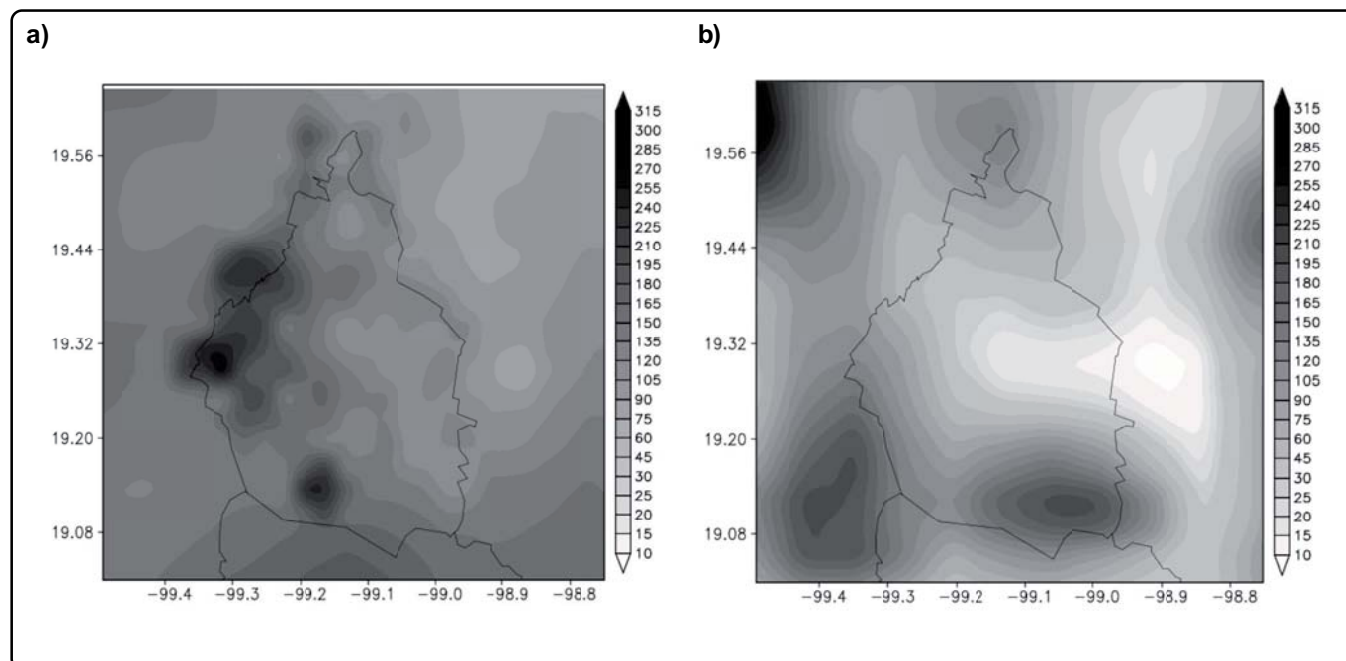


Figura 3. Climatología de: a) la precipitación acumulada de agosto observada y b) construida con pronósticos a 24 horas con el modelo MM5.

asociado al dipolo norte-sur encontrado en las observaciones, aunque existe persistencia en la ocurrencia de eventos en la parte sur. Dicha persistencia induce un sesgo en los resultados de los pronósticos.

Es necesario identificar los mecanismos que hacen que el modelo o las observaciones presenten un patrón espacial dominante tan diferente, para poder modificarlos y mejorar los pronósticos, principalmente los de eventos intensos. La persistencia en el patrón EOF1 de observaciones o del modelo, sugiere elementos estacionarios que dominan y crean dos situaciones contrastantes espacialmente.

Los resultados de la variable precipitación muestran la limitada habilidad del modelo para pronosticar en zonas como el Valle de México. Los errores sistemáticos están presentes en magnitud de la precipitación acumulada diaria, posición espacial y forma del campo pronosticado. Debido a que el modelo no presenta la sensibilidad mencionada para producir los patrones de lluvias intensas observadas, es posible pensar en que cualquier intento de pronosticar el tiempo a corto plazo con fines de acciones de prevención es en vano. Sin embargo, se trata de un problema de gestión de riesgo y, como tal, aún con imprecisiones, el uso de los pronósticos puede llevar a diseñar esquemas de prevención del desastre.

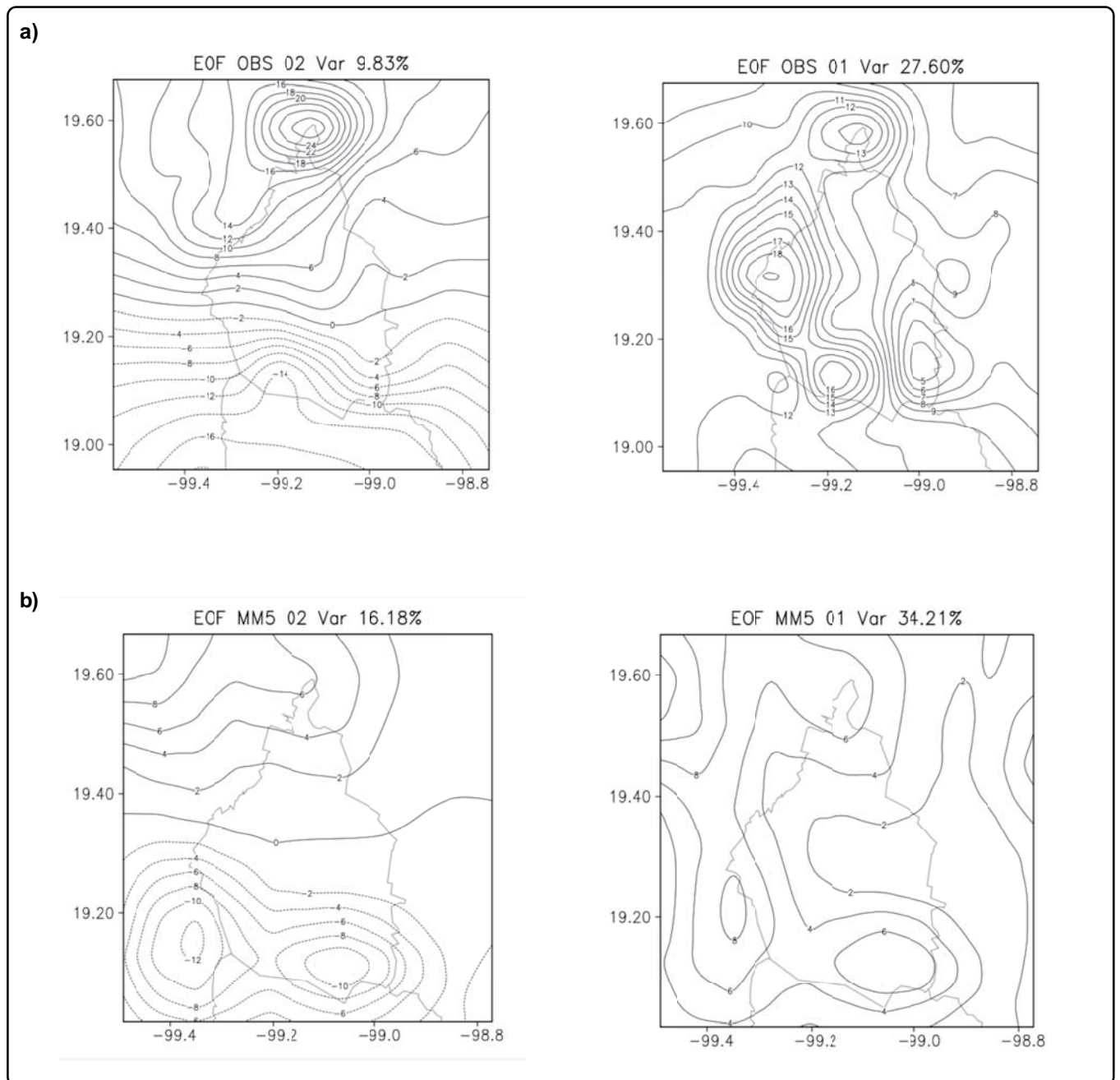
La gestión del riesgo

Los desastres pueden considerarse una "materialización del riesgo", lo que significa que éste alcanza en ocasiones niveles

por encima de un valor crítico. Explicar un desastre requiere documentar, tanto las características de los peligros como las de la vulnerabilidad, eliminando el enfoque naturalista que explica el desastre únicamente como la expresión de las fuerzas de la naturaleza. Poco a poco se reconoce que la vulnerabilidad es el elemento clave para poder hablar de impactos, ya que los sistemas y su funcionamiento dependen de muchas más cosas que sólo el tiempo meteorológico. Establecer cuánto es mucho o poco riesgo requiere por tanto cuantificar los peligros y la vulnerabilidad.

La población del Valle de México ha estado expuesta a amenazas meteorológicas desde épocas precolombinas. Conforme aumentó sus dimensiones, alterando el paisaje, creció su vulnerabilidad a sequías e inundaciones. Las épocas coloniales cambiaron la vulnerabilidad de la ciudad de México, con base en infraestructura para reducir el riesgo de inundaciones mediante obras hidráulicas. Durante el siglo XX los problemas de inundación se incrementaron aunados a otros relacionados con el rápido crecimiento de la población, principalmente aquella asentada en laderas de montañas, expuesta a inestabilidades.

La vulnerabilidad física, por una pendiente marcada y construcciones precarias, las pone en situación de riesgo intolerable ante tormentas con intensidad igual o mayor a 30 mm/hr cuando el suelo se encuentra saturado. En la ciudad de México las inundaciones (referidas como encharcamientos), resultado principalmente del escurrimiento en las montañas tras episodios de lluvias intensas, son las que frecuentemente



ocasionan afectaciones en la movilidad de la ciudad (Fig. 5). Las inundaciones por eventos de precipitación intensa pueden incluso presentarse en meses invernales como la ocurrida en 2010, que afectó la zona oriente del Distrito Federal por casi una semana. La distribución de los "encharcamientos" en el Distrito Federal refleja los escurrimientos asociados a las lluvias intensas en el poniente y sur del Valle de México.

Si bien la intensificación de las tormentas altera los escurrimientos en el poniente de la ciudad, ya que éstos se vuelven más intensos con lluvias severas, el cambio de uso de suelo ha provocado que la razón entre agua que se infiltra y agua que escurre se vea modificada y constituye un factor de vulnerabilidad en aumento, principalmente cuando se trata de lluvias intensas. Al perderse zonas de bosques consideradas de recarga, el agua que precipita ahora escurre en una mayor proporción que en el pasado y la que

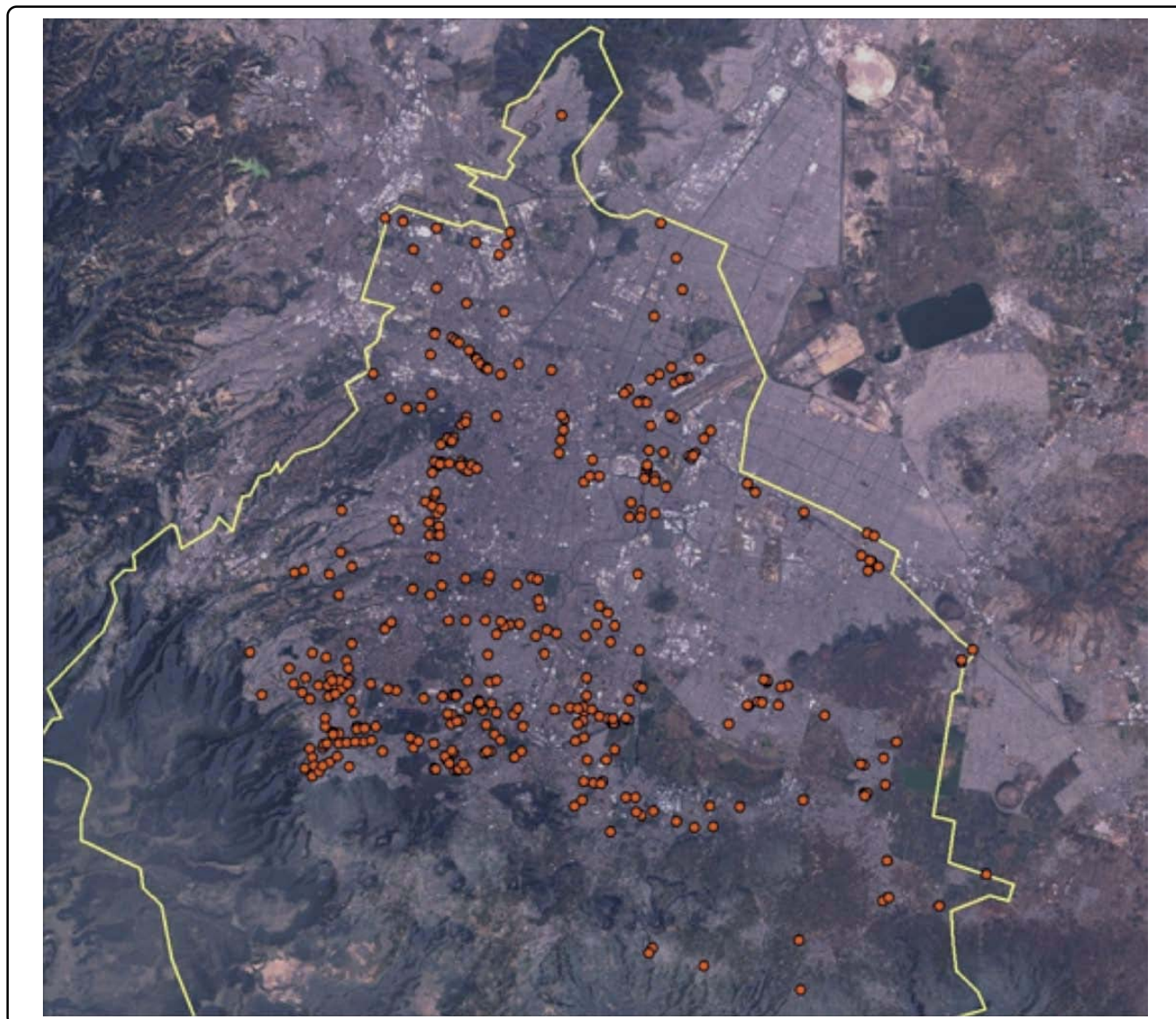


Figura 5. Puntos de encharcamiento en el Distrito Federal durante 2009.

infiltra se reduce. Al aumentar la intensidad de las lluvias y seguir creciendo la mancha urbana hacia las zonas de conservación, los escurrimientos en el poniente del Valle son más intensos afectando no sólo las laderas, sino incluso las partes centrales de la ciudad. Por lo tanto, las afectaciones bajo eventos de precipitación intensa pueden llegar más allá de las zonas de reciente urbanización, incluyendo las zonas centro y oriente (las más bajas). Por ello, la necesidad de un reordenamiento territorial es parte fundamental de las estrategias de reducción del riesgo en el Valle de México ante tormentas intensas. Las obras de drenaje tienen una capacidad límite y son costosas, pero los beneficios de la conservación de laderas en las montañas va más allá de sólo el efecto de mayor infiltración y menor escurrimiento. En algunos países en vías de desarrollo como México, se piensa

que los desastres, mal llamados naturales, son impredecibles y cada vez más recurrentes. Ante tal situación la sociedad juega un papel pasivo ante un elemento activo como la naturaleza. Las implicaciones de esta visión derivan en que, estado y sociedad no asumen claramente las responsabilidades inherentes a toda organización en materia de seguridad, al no reconocer la influencia de los procesos económicos y políticos en la vulnerabilidad. La tendencia oficial en materia de reducción de riesgo debe mostrar signos de transición de un sistema reactivo (ante desastres), a uno preventivo. La aplicación de un enfoque diferente considera que los siguientes factores deben ser tomados en cuenta para definir estrategias preventivas: Acciones estructurales para reducir vulnerabilidad y diagnósticos de vulnerabilidad para acciones preventivas puntuales.

CONCLUSIONES

A pesar de los avances en materia de pronóstico numérico del tiempo, existen aún problemas por resolver cuando se trata de mejorar las predicciones a corto plazo sobre regiones urbanizadas, en zonas tropicales y con orografía compleja como lo es la ciudad de México. Identificar los patrones de variabilidad de las lluvias diarias dominantes puede constituir un punto de partida en la búsqueda de las causas físicas que hacen al modelo alejarse de los campos observados. Al tratarse de un sistema altamente no lineal, encontrar "la razón de los errores en los modelos" no es una tarea sencilla, por lo que el problema sigue siendo actual.

Las instituciones encargadas de pronosticar el tiempo siguen interesadas en contar con pronósticos de alta resolución. Sin embargo, mientras persistan los problemas con la calidad de pronósticos de muy alta resolución espacial, seguirá siendo necesario construir esquemas de gestión de riesgo que permitan reducir la tendencia a un mayor número de desastres.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT- IT100712) y al proyecto CONACyT-SEMARNAT 107997 por los apoyos brindados. Este trabajo forma parte de la tesis de Ingeniería en Geofísica (UNAM) del Ing. Luis Clemente López-Bravo. Enlace digital: <http://132.248.9.195/ptd2012/junio/0681178/Index.html>

REFERENCIAS

1. Kalnay, E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability (Cambridge University Press, 2003) 328 pp.
2. Jáuregui, E. El Clima de la Ciudad de México, Temas selectos de Geografía de México, UNAM. 1a. edición (2000). 131 págs.
3. Magaña, V. & Neri, C. Eventos Hidrometeorológicos Extremos en el Valle de México (Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, 2007). Págs. 26-30.
4. Joyce, R., Janowiak, J., Arkin, P. & Xie, P. CMOPRH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology* **5**, 487-503 (2004).
5. Cressman, G. An operational objective system. *Monthly Weather Review* **87**, 367-374 (1959).
6. Orlanski, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society* **56**, 527-530 (1975).
7. Anthes, R.A. & Warner, T.T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Monthly Weather Review* **106**, 1045-1078 (1978).
8. Wilks, D. Statistical Methods in Atmospheric Sciences (Academic Press, 1995) 467 pp.
9. Pérez, J. Pronóstico Numérico del Tiempo para el Valle de México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM (2004). 69 págs.
10. Aquino Martínez, L.P. Impacto de la urbanización sobre la dinámica de las tormentas en el Valle de México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM (2012). 74 págs.