



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL PRONÓSTICO
NUMÉRICO DEL TIEMPO EN LA CIUDAD MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A

LUIS CLEMENTE LÓPEZ BRAVO

JURADO EXAMINADOR

Dr. Víctor O. Magaña Rueda (Tutor)

Dr. Carlos Ortiz Alemán

Dr. Ernesto Dos Santos Caetano Neto

M.C. René Garduño López

M.C. David Escobedo Zenil

Ciudad Universitaria, Febrero 2012

Dedicatoria

A mi mamá, hermana y abuelita Rafa por su apoyo incondicional durante toda la vida, por su amor, cariño y comprensión... Solamente les puedo dar las gracias, porque sin ustedes nada de esto sería posible.

A Armenia por apoyarme día tras día dándome el ánimo de seguir, por ser mi compañera en momentos de felicidad y pena, gracias por tu amor y cariño.

A mis tíos y primos gracias por su todo su apoyo y cariño.

A la familia Franco Díaz, por recibirme con ese enorme cariño que los caracteriza.

A mi amigo Carlos y familia que siempre me han hecho sentir como un integrante más de la familia.

A mis amigos Tere, Guille, Chacón, Oscar, Karla, Alejandra y todos lo que no menciono, gracias por su amistad.

Agradecimientos

Al Dr. Víctor Magaña por la dirección de esta tesis, por su paciencia y confianza en la elaboración de este trabajo. Por mostrarme la importancia de las Ciencias Atmosféricas en México.

Al Dr. Ernesto Caetano por su siempre buena disposición a atender mis dudas y por todos sus consejos y observaciones a este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Carlos Ortiz Alemán, Dr. Víctor Magaña Rueda, Dr. Ernesto Caetano Neto, M.C. René Garduño López, M.C. David Escobedo Zenil, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y a todas sus valiosas sugerencias.

Al Dr. Matías Méndez Pérez por su incansable paciencia para resolver mis dudas y por todo el apoyo dado en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Tomás Morales Acoltzi por todo el apoyo otorgado.

Al Ing. Gustavo Vázquez Cruz por sus consejos y soporte en mi estancia en el grupo.

A todos mis compañeros del Grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Geografía por los buenos momentos que he pasado con todos ustedes.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque le debo toda mi formación académica.

A la Facultad de Ingeniería y a todos mis profesores por enseñarme el sentido del compromiso y trabajo.

Al Instituto de Geografía por permitirme realizar este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca a cargo del proyecto *“UNA ESTRATEGIA PARA LA REDUCCIÓN DE RIESGOS METEOROLÓGICOS EN PROTECCIÓN CIVIL BASADA EN INFORMACIÓN DE TIEMPO Y CLIMA”*.

Índice general

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	2
1.1. PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL TIEMPO	2
1.1.1 DESARROLLO DEL PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL TIEMPO EN LA HISTORIA.....	5
1.2. MODELOS NUMÉRICOS USADOS EN EL PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL TIEMPO Y SU EVALUACIÓN	8
1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS	8
1.2.2. EL MODELO NUMÉRICO DE MESOESCALA MM5.....	10
1.2.3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE PRONÓSTICO	14
1.2.4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN	15
1.3 EL INTERÉS DE LOS PRONÓSTICOS DEL TIEMPO EN EL DISTRITO FEDERAL	16
1.4 OBJETIVOS	17
CAPÍTULO 2 DATOS Y METODOLOGÍA	18
2.1 DESCRIPCIÓN DE DATOS PARA EL DISTRITO FEDERAL.....	18
2.1.1 DESCRIPCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN	18
2.1.2 DESCRIPCIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA MÁXIMA (TMAX) Y TEMPERATURA MÍNIMA (TMIN)	20
2.1.3 DESCRIPCIÓN DE DATOS DE VIENTO	22
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN POR SATÉLITE CMORPH.....	24
2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE REANÁLISIS NARR.....	25
2.4 METODOLOGÍA.....	26
2.4.1 CORRECCIÓN DE CAMPOS DE TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA	26
2.4.2 ESQUEMA DE ASIMILACIÓN DE DATOS, ANÁLISIS OBJETIVO TIPO CRESSMAN	29
2.4.3 SALIDAS MM5.....	37
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	38
3.1 BREVE SÍNTESIS DEL CLIMA Y CONDICIONES DE TIEMPO PARA EL DISTRITO FEDERAL.....	38

3.1.1	PRECIPITACIÓN	38
3.1.2	TEMPERATURA.....	43
3.1.2.1	Temperatura máxima.....	43
3.1.2.2	Temperatura mínima	46
3.2	EVALUACIÓN DEL MODELO DE MESOESCALA MM5	49
3.2.1	EVALUACIÓN DE TEMPERATURA	49
3.2.1.1	Evaluación de temperatura máxima	50
3.2.1.2	Evaluación de temperatura mínima	53
3.2.2	EVALUACIÓN DE PRECIPITACIÓN.....	56
3.3	HIPÓTESIS DEL ERROR EN EL MODELO.....	61
 CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		64
4.1.	CONCLUSIONES.....	64
4.2	TRABAJO FUTURO	65
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		66
RECURSOS ELECTRÓNICOS		68

RESUMEN

La necesidad de conocer la confianza del pronóstico de tiempo en el Distrito Federal, ha llevado a desarrollar una evaluación para las variables de temperatura y precipitación a 24 horas. El modelo de mesoescala en su versión 5 (MM5), el cual fue desarrollado por la Universidad de Pennsylvania y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR por sus siglas en inglés). El dominio utilizado cuenta con una resolución de 9×9 km y los pronósticos de tiempo atmosférico empleados en el análisis, se realizaron de forma operativa para el periodo de 2008 a 2010. Fue necesario construir los campos observados con la misma resolución espacial y temporal para realizar una comparación directa entre los campos de las variables de precipitación y temperatura. Encontrando que el campo de temperatura es simulado de forma adecuada por el modelo MM5. En el caso de la variable de precipitación, el pronóstico resulta más complejo porque el modelo presenta errores sistemáticos en ubicación y patrón de eventos intensos de precipitación. Los errores encontrados parecen estar relacionados a una pobre descripción de procesos orográficos y los relacionados a la urbanización en el MM5. Al tratarse de un problema de condición inicial con condiciones de frontera, los errores en el MM5 pueden ser reducidos mediante la mejora de la condición inicial que capture circulaciones de mesoescala, además de una mejor descripción de la componente orográfica y de los flujos en superficie.

ABSTRACT

The need establish the confidence on local weather predictions has led to develop an evaluation analysis for 24 hour predictions of temperature and precipitation over Federal District. The Mesoscale Model Version 5 (MM5), developed at the Pennsylvania State University and the National Center for Atmospheric Research (NCAR). The domain has a spatial resolution of $9\text{km} \times 9\text{km}$ and daily weather forecasts have been produced for the 2008 to 2010 in an operational manner. Observed temperature and precipitation fields were prepared at the same spatial and temporal resolution for a direct pattern comparison. It is found that temperature fields are adequately predicted by the MM5. Precipitation forecasts are more difficult to obtain, since the model exhibits systematic biases in the shape and location of the centers of intense precipitation. The errors appear to be related to an inadequate representation of the orographic and urban processes in the MM5. As an initial value problem with boundary conditions, the errors in MM5 may be reduced by a more accurate initial condition that captures mesoscale circulations, and an improved representation of the orographic characteristics and the surface fluxes.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Pronóstico numérico del tiempo

El ser humano se encuentra expuesto a fenómenos atmosféricos que representan una amenaza para su bienestar y entorno, motivos que han despertado su interés para comprender y tratar de explicar la ocurrencia de eventos naturales en su hábitat. Con describir la ocurrencia de estos fenómenos no sacia su inquietud, lo que ha llevado a tratar de entender el porqué de estos. Durante el s. XX, gran parte del estudio desarrollado para la comprensión de fenómenos atmosféricos, impulsando áreas como el pronóstico numérico del tiempo en la década de 1950, llevando al desarrollo de modelos numéricos de predicción del tiempo que hoy son una potente herramienta para estudiar fenómenos relacionados con la dinámica de la atmósfera.

Cuando se habla de pronosticar el tiempo meteorológico bajo una visión tradicional, se piensa en el estado momentáneo de la atmósfera en un lugar determinado. Sin embargo, dicha concepción debe ser ampliada, tal como la planteó Edward Lorenz quien dijo “tiempo es lo que usted tiene, mientras que clima es lo que usted espera”. Una forma de explicar la diferencia entre tiempo meteorológico y clima, es considerar una ecuación de pronóstico e integrarla en el tiempo para mostrar las variaciones al momento de ser integrada. Los cambios mostrados en tiempo y espacio se pueden dividir en dos componentes una estable y una inestable, la componente estable de la ecuación de pronóstico corresponde al clima, mientras la componente inestable podemos referirla al tiempo (Fig. 1.1). Por la no-linealidad del problema, la componente inestable provoca que el error se incremente de forma rápida en un periodo de tres a siete días de ahí que no sea posible pronosticar determinísticamente más allá de ese intervalo (Landa et al. 2009). Aún teniendo modelos y observaciones perfectas, el límite teórico de predicción del tiempo en forma útil es de dos semanas (Lorenz 1963). En la actualidad los productos generados en algunos centros de pronóstico muestran habilidad para pronosticar por más de una semana (Kalnay 2010). Se puede decir que pronosticar el tiempo se trata de reproducir las inestabilidades de la

componente de alta frecuencia que dan origen al tiempo por medio de un modelo numérico. Un ejemplo es predecir el desarrollo de una nube *cúmulus* (inestabilidad atmosférica) que produzca lluvias severas (tiempo atmosférico).

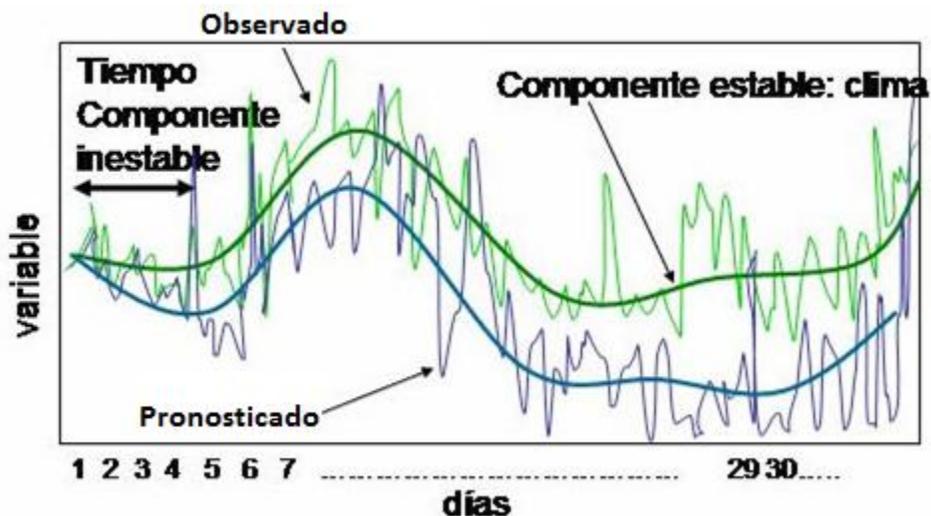


Figura 1.1: Muestra diferencia entre la componente inestable asociada al tiempo meteorológico y la componente estable que hace referencia al clima, modificado de (Landa et al. 2009)

Realizar pronóstico numérico del tiempo en forma determinística parte de establecer la mejor condición inicial del estado de la atmósfera para poder inicializar el modelo (la más cercana a la realidad). “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” (Kalnay 2003). 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 la información “verdadera” en todo el dominio atmosférico. Se han desarrollado nuevas tecnologías y algoritmos para conocer el estado de la atmósfera con mayor precisión, usando información satelital, radiosondeos, información de estaciones de superficie, aviones meteorológicos, etc., logrando con ello tener una buena aproximación de la condición inicial. Pero lo anterior no es suficiente para inicializar el modelo y hablar de que se tiene la mejor condición inicial. Desde la década de 1980 se ha trabajado en esquemas de asimilación de datos que permiten determinar no solo una buena condición para inicializar el modelo de pronóstico, sino que contiene información adecuada de la condición que puede amplificar una perturbación (inestabilidad) a un estado más cercano a la realidad (Fig. 1.2b) o a una solución totalmente errónea (Fig. 1.2a).

Obtener pronósticos que reproduzcan las inestabilidades que dan origen al tiempo atmosférico, depende esencialmente en tomar la mejor condición inicial, pero existen

elementos dentro de los modelos que son clave al realizar un pronóstico. Las parametrizaciones de procesos que no pueden ser resueltos de forma explícita dentro del modelo (e.g., procesos turbulentos), deberán ser elegidas en función de los procesos físicos que dominan y que se deseen describir en el dominio a pronosticar. Otros factores que afectan la realización del pronóstico son los métodos numéricos elegidos para resolver las ecuaciones de pronóstico, la resolución espacial del modelo, el sistema de coordenadas, etc. La buena elección de dichas condiciones dependerá del conocimiento de la física y dinámica de atmósfera que se tenga. La decisión de usar determinados elementos disponibles dentro del modelo también llevará a resultados distintos, aun partiendo de la misma condición inicial.

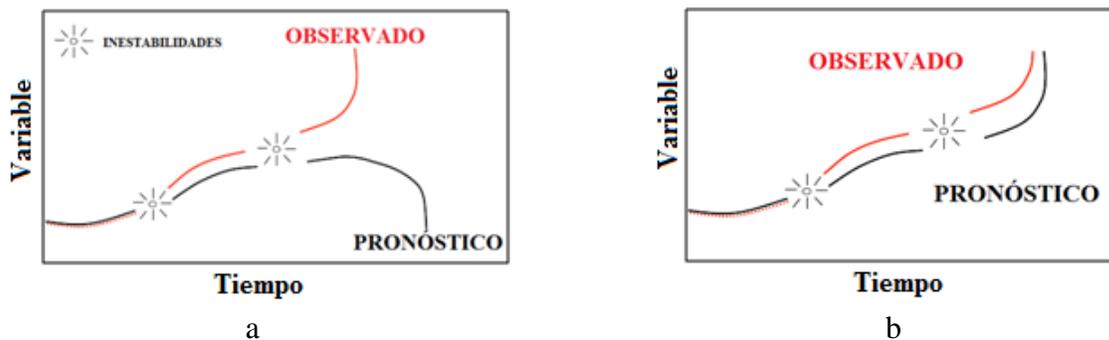


Figura 1.2: Asimilación de datos y pronóstico numérico del tiempo, (a) la condición inicial perturbada está afectada por inestabilidades del modelo que pueden llevar a soluciones “erróneas” a consecuencia de la no linealidad (b) si la condición inicial es perturbada nuevamente, el pronóstico parte de otro estado de la atmósfera que puede llevar a una solución más cerca de la realidad

Entonces, se puede pensar ¿Qué pronóstico generado es el más cercano a la realidad? Una de las posibles respuestas a esta pregunta se puede dar mediante la implementación de un esquema de verificación o evaluación del pronóstico (Fig. 1.3), basado en un análisis histórico de observaciones y pronósticos para poder detectar posibles errores en el modelo que nos lleve a corregir la física misma del modelo o a calibrar las salidas del modelo por medio de un esquema de post-procesamiento, que dote al pronóstico de mayor valor.

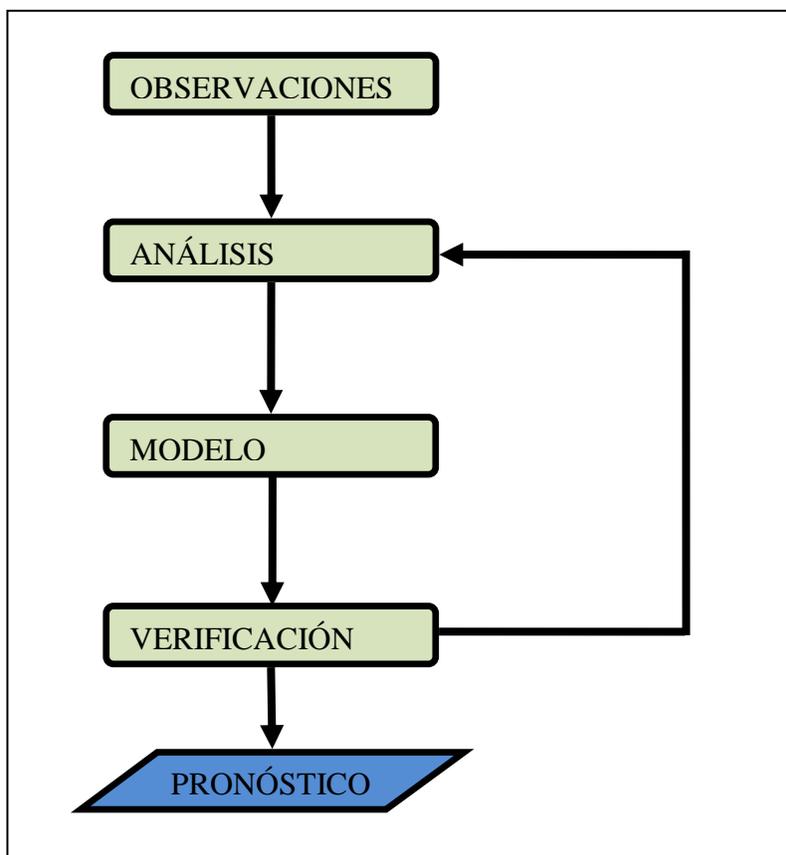


Figura 1.3: Secuencia general de verificación de pronóstico numérico de tiempo en forma de diagrama de flujo

1.1.1 Desarrollo del pronóstico numérico del tiempo en la historia

La idea de pronosticar el tiempo en forma numérica fue propuesta a inicios del siglo XX por el físico noruego Vilhelm Bjerknes¹, considerado el padre de la Meteorología moderna, planteó convertir el pronóstico en una ciencia fundada en el estudio de las leyes físicas que permitieran describir el comportamiento de la atmósfera. Por ello, Bjerknes en 1904 propuso pronosticar el tiempo (Golding et al. 2004), bajo un planteamiento matemático de condiciones iniciales, basado en la solución de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales en el dominio del tiempo. Para resolver el sistema de ecuaciones planteado, tuvo que desarrollar un método basado en técnicas gráficas con el que podía hacer cálculos sobre cartas meteorológicas. Esta consideración la hizo a consecuencia de la complejidad para hallar la solución analítica del sistema de ecuaciones.

¹ *Vilhelm Friman Koren Bjerknes* (14 de marzo de 1862 – 9 de abril de 1951). Físico y meteorólogo noruego, planteó las bases del pronóstico numérico del tiempo.

Aunque Bjerknes no consideró hacer los cálculos de forma numérica, la visión de adoptar una nueva filosofía para pronosticar el tiempo, fue el referente para científicos que en años posteriores continuaron investigando y desarrollando el pronóstico numérico del tiempo. La aportación hecha por este científico noruego define una línea divisoria en la historia de la Meteorología por el hecho de llevar esta área al ámbito científico, marcando con ello el inicio de la Meteorología moderna, basada en la física de la atmósfera apoyada en las matemáticas y la informática.

El matemático británico Lewis Fry Richardson² en 1916 trabajó en la solución aproximada a ecuaciones diferenciales (ecuación de la tendencia de la presión en superficie) usando el análisis numérico. El método desarrollado por Richardson era similar al propuesto por los matemáticos Carl Runge en 1885 y Wilhelm Kutta en 1901 (Phillips 1999), el cual consistía en obtener la solución aproximada a ecuaciones diferenciales ordinarias por medio de diferencias finitas. Al interesarse Richardson en la Meteorología, trabajó en un algoritmo para predecir el tiempo meteorológico de forma numérica basado en la teoría desarrollada por Bjerknes, realizando un experimento de pronóstico del campo de presión en superficie para un solo punto en Europa, a un periodo de seis horas. Realizar los cálculos le llevo seis semanas, resultando la predicción completamente irreal debido principalmente a errores numéricos. Sin embargo, la forma de resolver las ecuaciones diferenciales fue una gran aportación, porque hasta el día de hoy el pronóstico del tiempo se puede obtener por la solución numérica de las ecuaciones de pronóstico.

Richardson mostró que aunque en su época no existían los recursos para generar el pronóstico, el reto era importante, lo que queda plasmado en su publicación "*Weather Prediction by Numerical Process*" en 1922. Pasaron algunas décadas para que se dieran grandes avances en la materia, la espera fue obligada hasta alcanzar el nivel tecnológico de cómputo requerido para realizar el pronóstico numérico del tiempo.

Durante la Segunda Guerra Mundial la informática se desarrolló de una forma acelerada a consecuencia de los intereses militares, con los avances de esta área, los meteorólogos obtuvieron grandes beneficios que les permitieron tener por primera vez las herramientas necesarias para poder realizar un pronóstico numérico de tiempo en un equipo de cómputo. La decisión de centrarse en el estudio del pronóstico numérico del tiempo estuvo determinada por el marcado interés de la milicia de los Estados Unidos de América en la Meteorología. Con esta nueva línea de investigación garantizó el financiamiento del proyecto para la construcción del equipo de cómputo.

² Lewis Fry Richardson (11 de octubre de 1881 – 30 de septiembre de 1953). Matemático, físico, meteorólogo y pacifista, pionero en técnicas modernas de modelación numérica del tiempo.

El grupo encargado de la parte Meteorológica fue encabezado por Jule Charney³ en la década de 1950, quien junto a sus colaboradores, desarrollaron un modelo simplificado de las ecuaciones de predicción del tiempo, demostrando la viabilidad de implementarlo en la computadora (Frederick 1989), consiguiendo el permiso de usar una de las primeras supercomputadoras desarrolladas, la ENIAC (por sus siglas en inglés). Este hecho marcó el inicio de una nueva etapa para el pronóstico numérico del tiempo, etapa que se ha prolongado hasta nuestros días.

A consecuencia de todos los avances alcanzados en materia de pronóstico meteorológico, muchos países implementaron sistemas operativos de pronóstico numérico, los cuales se han desarrollado enormemente desde su creación, algunos ejemplos son: El Centro Nacional de Predicción para el Medio Ambiente de EUA (NCEP, por sus siglas en inglés), el Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo de Mediano Plazo (ECMWF, por siglas en inglés), la Agencia Meteorológica Japonesa, la Oficina de Tiempo de Canadá, entre otros.

En sus inicios los modelos estaban limitados al hemisferio norte, dado el poder de cómputo y la cantidad de observaciones disponibles para inicializarlos. Entre 1960 y 1970 el poder de cómputo se incrementó y las fuentes de datos aumentaron con la incorporación de información satelital, permitiendo expandir el dominio y modelos usados para el pronóstico, hasta correr por primera vez un modelo global en 1974. En las décadas subsecuentes se hicieron grandes modificaciones a los modelos como el uso de esquemas que permitieran representar procesos físicos en la atmósfera de forma más precisa (radiación, nubes, convección, etc.). Mejorar la condición inicial para arrancar el modelo fue determinante en la mejora de la habilidad del modelo, esto se logró con el desarrollo de la teoría de asimilación de datos (Kalnay 2003). Al estudiar el comportamiento caótico y no lineal de la atmósfera, NCEP realizó el primer pronóstico generado a partir de un ensamble, consistiendo en perturbar las condiciones iniciales; usando diferentes métodos como el método de Monte Carlo, descomposición en valores singulares, etc. (Harper et al. 2007). Dicha aproximación al modelo resultó útil en predicciones a mediano y largo plazo, por lo que los grandes centros meteorológicos implementaron el pronóstico del tiempo por ensambles de forma operativa.

En la actualidad el pronóstico numérico del tiempo se sigue desarrollando con base en la investigación en diversas áreas de las Ciencias Atmosféricas, teniendo como eje rector la física de la atmósfera. En el caso de las estimaciones del estado de la atmósfera obtenidas, tienen un alto grado de similitud con la realidad en corto plazo (uno a tres días), lo que se logra por el uso de modelos refinados, esquemas de pre y post procesamiento de la información que permiten integrar datos de diversas fuentes de observación.

³ *Jule Gregory Charney* (1 de enero de 1917 – 16 de junio de 1981). Físico y meteorólogo, realizó con un grupo de meteorólogos y matemáticos el primer pronóstico numérico útil con la supercomputadora ENIAC.

1.2. Modelos numéricos usados en el pronóstico numérico del tiempo y su evaluación

Tratar de explicar los fenómenos naturales que ocurren en nuestro entorno puede ser abordado desde diferentes puntos de vista. Algunos parten de métodos tan sencillos como los basados en la descripción y experiencia de las personas. Por otra parte existen los métodos en los que se busca explicar estos fenómenos usando principios y leyes físicas desarrollados a lo largo de la historia de la humanidad. Partiendo de esta última visión, el estudio de la atmósfera se ha basado en la física de procesos a diferentes escalas de espacio y tiempo. Para generar modelos es necesario hacer un estudio de las variables que integran al sistema, y posteriormente realizar un análisis de escala pensando en resolver algún problema en específico. Los modelos pueden ir desde lo más elemental hasta contar con complejos y refinados esquemas, que dependerán de las necesidades o el conocimiento que se tenga del fenómeno. En la solución de estos sistemas pueden intervenir métodos analíticos o numéricos, la elección entre uno y otro dependerá de diversos factores como la complejidad de las formulaciones o el tiempo disponible para realizar los cálculos. En el caso de la atmósfera, la mejor solución para los modelos propuestos ha sido la numérica, teniendo en mente que los resultados son soluciones aproximadas de la solución real. Una buena elección del método numérico a usar, podrá mejorar significativamente los resultados, si el método se comporta estable durante todo el proceso y los errores definidos no rebasan un umbral que garantice la convergencia a la solución.

De acuerdo con lo anterior, se puede definir un modelo numérico de predicción del tiempo como un conjunto de instrucciones ejecutadas en un equipo de cómputo (programa), el cual resuelve las ecuaciones de pronóstico mediante técnicas numéricas para generar una aproximación del estado futuro de la atmósfera.

1.2.1. Clasificación de los modelos

Los modelos numéricos usados en las Ciencias Atmosféricas se han clasificado en base a la escala temporal y espacial de los fenómenos a estudiar. Las clasificaciones se han realizado con base en las formulaciones de los modelos y su utilidad para pronosticar el tiempo. El dominio (Fig. 1.4a) en un modelo numérico es el área para la cual se integra el modelo y se obtienen soluciones (bajo el esquema de diferencias finitas). La cobertura (Fig. 1.4b) del modelo se hace mediante una malla a espacios constantes en dirección zonal, meridional y en la vertical, se deben elegir los niveles entre la frontera superior e inferior, cada nodo de la malla corresponde a un punto sobre la superficie y niveles de referencia elegidos, donde las ecuaciones serán resueltas.

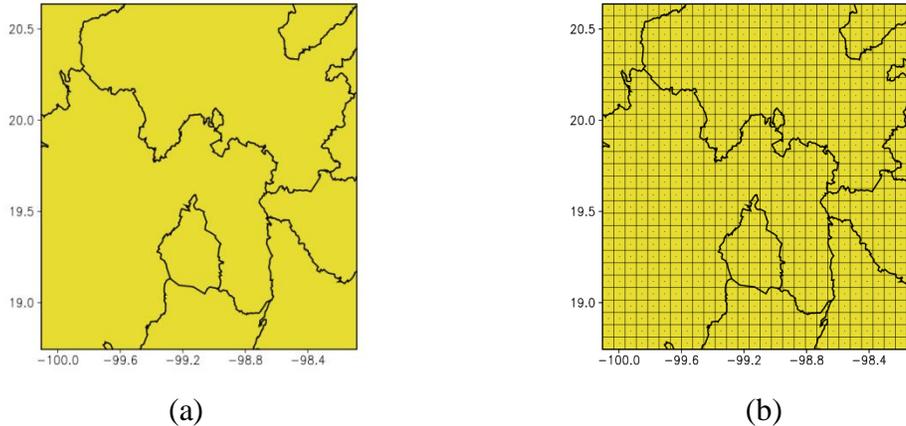


Figura 1.4: (a) Dominio del modelo, (b) resolución zonal y meridional

Los *modelos de circulación general* permiten obtener aproximaciones de procesos importantes que ocurren en la atmósfera a nivel global y a escalas de tiempo diversas. Usan resoluciones espaciales que van de decenas a cientos de kilómetros. Para modelos de circulación general de tipo dinámico se deben considerar los procesos de mayor influencia en la circulación del planeta como el flujo de energía térmica, cantidad de energía recibida y emitida en forma de radiación de onda larga y corta, etc. El uso principal de estos modelos es generar predicciones a mediano plazo, estaciones y climáticas.

Los *modelos regionales*, también conocidos como modelos de área limitada, creados para comprender procesos físicos a escalas locales y la necesidad de contar con información meteorológica cada vez más detallada de regiones en específico con fines distintos a la investigación (protección civil, agricultura, tránsito aéreo, etc.). Se caracterizan por tener condiciones de frontera bien definidas en dirección horizontal y vertical. En la actualidad los modelos son capaces de simular la dinámica de la atmósfera en resoluciones espaciales muy altas (unos cuantos kilómetros). Más allá de esta resolución espacial, los modelos que consideran parametrizaciones deben describir en forma explícita procesos como la formación de nubes o la dinámica de la capa límite planetaria. Por ello, para tratar de generar pronósticos cada vez más locales se debe contemplar una mayor cantidad de fenómenos físicos, mejorando al mismo tiempo las redes de observación, el poder de cómputo disponible y el entendimiento de procesos.

Entender los procesos de mesoescala en el pronóstico numérico del tiempo para modelos regionales es fundamental para el diseño de los experimentos. 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 (Tabla 1.1). Realizar pronóstico numérico de variables como temperatura, precipitación, viento, humedad

relativa, en escalas menores a 20 km, determina trabajar en la mesoescala gamma, esto implica conocer 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, velocidad vertical, etc. Existen forzantes de gran impacto llamados parámetros estáticos, la topografía y 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, provocando un cambio en la dinámica de la atmósfera del Distrito Federal.

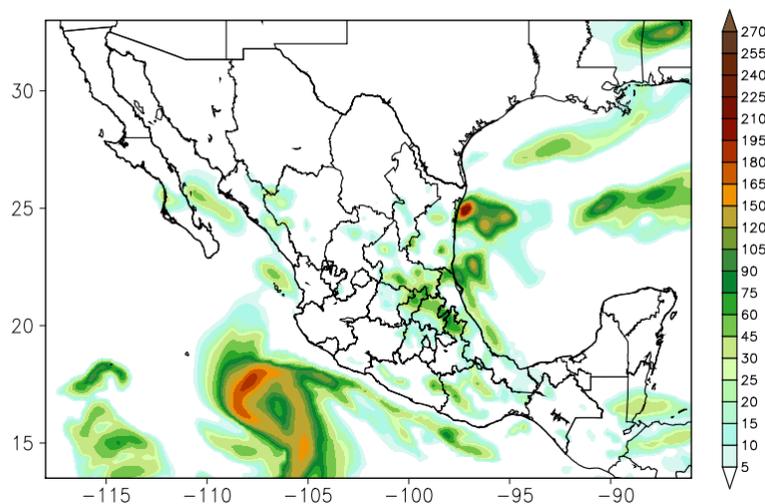
Nombre	Dimensiones [km]	Tiempo
Mesoescala – alfa	200 – 2000	6 h a 2 días
Mesoescala – beta	20 – 200	30 min. a 6 h
Mesoescala – gamma	2 – 20	3 min. a 30 min.

Tabla 1.1: Clasificación mesoescala (Orlasnki 1986)

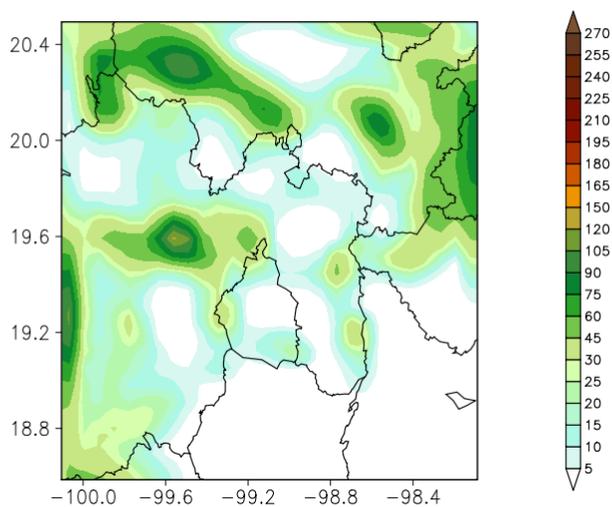
1.2.2. El modelo numérico de mesoescala MM5

El modelo de mesoescala MM5 (por sus siglas en inglés) fue desarrollado originalmente por Anthes y Warner en 1978 en la Universidad de Pennsylvania y enriquecido con el tiempo por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR por sus siglas en inglés) de EUA, hasta la quinta y última generación. Durante el desarrollo del modelo sufrió cambios que fueron reflejados en una mayor habilidad al momento de realizar pronóstico a diferentes escalas, gracias a la flexibilidad y portabilidad del modelo ha tenido gran difusión entre centros de pronóstico operativo e instituciones de investigación en Ciencias Atmosféricas.

El desarrollo e implementación de la modelación numérica del tiempo en México, inicia en la década de 1990 en la Universidad Nacional Autónoma de México, realizando pruebas de sensibilidad y calibración para obtener pronósticos a corto plazo, de los cuales se pudieran realizar diagnósticos del estado de la atmósfera sobre la República Mexicana (Fig. 1.5a). Con el tiempo se incursionó en el pronóstico operativo para el Distrito Federal y sus alrededores (Fig. 1.5b). Por los resultados obtenidos, grupos de investigación dentro y fuera de la universidad se interesaron en el modelo MM5 generando una transferencia de conocimiento a instituciones como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En la actualidad los grupos han migrado al uso del modelo WRF, una nueva versión del MM5 con fines de pronóstico operativo del tiempo meteorológico.



a



b

Figura 1.5: (a) Pronóstico operativo de precipitación acumulada a 24 h para la República Mexicana del 30 de agosto del 2009, (b) pronóstico de precipitación acumulada a 24 h para el Distrito Federal y Zona Metropolitana del 8 de julio del 2010

El sistema de modelación MM5 se constituye por módulos de pre-procesamiento y post - procesamiento de la información. Cada uno de estos módulos realiza labores específicas en una secuencia de procesamiento en forma de diagrama de flujo (Fig. 1.6), 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.

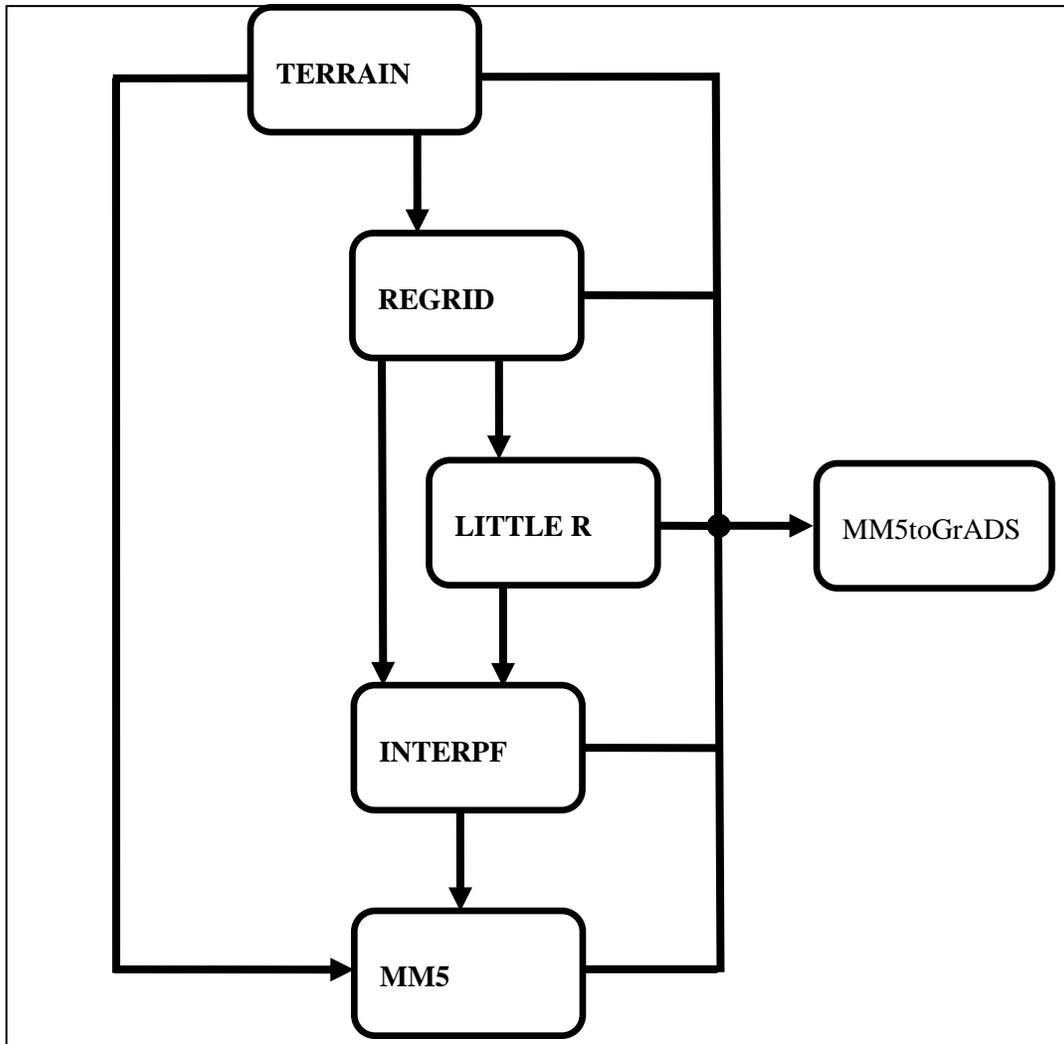


Figura 1.6: Diagrama de flujo para la configuración básica del modelo de mesoescala (MM5). Modificado de http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/MM5_tut_Web_notes/INTRO/intro.htm

TERRAIN: Se encarga de definir el dominio de trabajo, la resolución y los dominios anidados (Fig. 1.7). La información de topografía, uso de suelo y cobertura vegetal, es interpolada a la resolución de interés y puesta en malla con proyección cartográfica definida en el diseño del experimento.

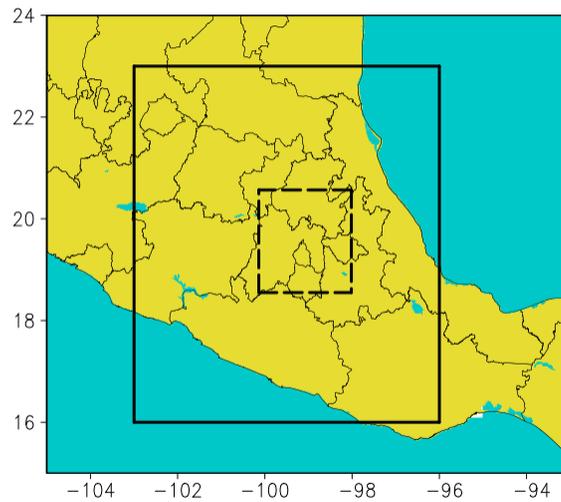


Figura 1.7: Representación de dominio madre (línea continua) y dominio anidado (línea discontinua)

REGRID: El propósito de este módulo es leer y extraer información de variables meteorológicas (componentes zonal y meridional del viento, temperatura, presión, humedad relativa, etc.) de archivos generados por simulaciones de gran escala, archivos históricos, estimaciones de satélite o reanálisis, que servirán como campos iniciales al arrancar el modelo. Para realizar la interpolación, es necesario contar con las mallas generadas por el módulo TERRAIN.

LITTLE_R: Módulo conocido también por asimilación de datos, este módulo puede ser omitido dependiendo de la configuración usada, pero es muy recomendable su uso porque en él, se puede realizar un análisis tipo objetivo (Cressman, elipsoide, banana), usando información de estaciones meteorológicas en superficie, radiosondeos, globo cautivo, etc., para mejorar la condición inicial del modelo.

INTERPF: Realiza la interpolación de la información de niveles de presión a niveles sigma el sistema de coordenadas sigma permite describir de una forma “realista” la topografía dentro del modelo (Fig. 1.8).

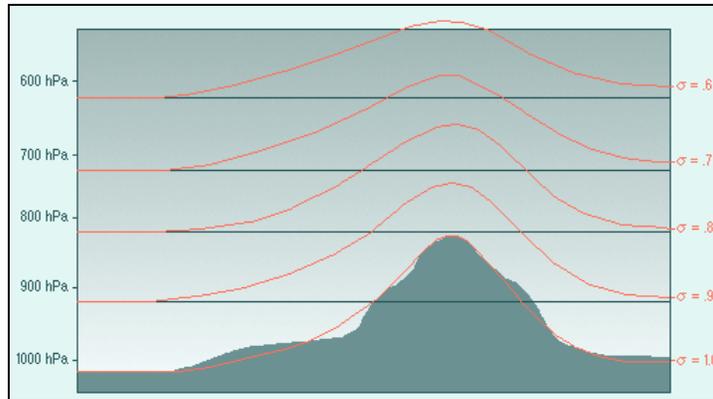


Figura 1.8: Diferencia entre coordenadas de presión (línea negra) y coordenadas sigma (línea roja). (Tomado del módulo Impacto de la Estructura y Dinámica de los Modelos COMET)

MM5: Es el módulo más importante del modelo porque en él se realiza la solución de las ecuaciones de pronóstico basadas en principios físicos, usando el método de diferencias finitas. Antes de correr el experimento es necesario definir la interacción entre los dominios, el paso de tiempo a usar en la integración, definir las parametrizaciones de procesos no explícitos como nubes, microfísica, capa límite.

El despliegue de campos de pronóstico en superficie y altura se puede realizar con la utilidad MM5toGrADS que permite extraer las variables en el sistema de coordenadas deseado por el usuario. La información puede ser graficada con el sistema de despliegue (GrADS por sus siglas en inglés) o manipulada con programación de alto nivel (Fortran, C).

1.2.3. Verificación y validación de pronóstico

Desde la creación del pronóstico numérico del tiempo, 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?, contempla una serie de etapas partiendo de estar conscientes que los modelos generan aproximaciones del estado de la atmósfera y son susceptibles a errores propios del modelo, de condición inicial y configuración del modelo; lo anterior estará reflejado en la habilidad del modelos para resolver determinadas situaciones asociados a fenómenos de escala sinóptica o de mesoescala. Los métodos de evaluación han evolucionado desde simples comparaciones visuales hasta esquemas complejos como el pronóstico cuantitativo de la precipitación, por la necesidad de conocer a más detalle la eficiencia de los modelos, esta razón obliga el uso de medidas de calidad diferente a las tradicionales como la media, error cuadrático medio (ECM), coeficientes de

correlación (error en las medias), esto no quiere decir que no sean útiles, pero la información obtenida de ellas no permite tener una visión íntegra del problema.

1.2.4. Métodos de evaluación

Verificación visual de las predicciones: La verificación más sencilla que se puede ocurrir es comparar de forma visual las salidas del modelo con una fuente de datos observados, la comparación puede ser hecha confrontando valores puntuales, usando información de estaciones meteorológicas en superficie o comparar campos en arreglos de malla. La verificación visual no es una medida cuantitativa de la habilidad del modelo, porque es susceptible a 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.

Verificación mediante tablas de contingencia: La evaluación dicotómica o binaria (Tabla 1.2), consiste en dar un puntaje mediante una afirmación o negación sobre la ocurrencia de un evento. La ocurrencia de tormentas severas o la sola ocurrencia de eventos de precipitación, ondas de calor, son ejemplos de aplicación. Considerando la frecuencia de ocurrencia de cada una de las categorías establecidas, los resultados pueden agruparse en una tabla de contingencia. En un trabajo previo realizado por Pérez en 2004 se realizó la evaluación del modelo MM5 para el Valle de México usando tablas de contingencia.

Pronóstico binario		Observado		
		Sí	No	Total
Pronóstico	Sí	Aciertos	Falsa alarma	Pronóstico ocurrencia
	No	Error	Negativo Correcto	Pronóstico no ocurrencia
	Total	Observado	No ocurrió	Todos los casos

Tabla 1.2: Estructura general de una tabla de contingencia, tipo binaria

La evaluación multicategoría se basa en tablas dicotómicas, la diferencia es realizar una serie de categorías con más de dos opciones. Usando el pronóstico de precipitación para evaluar intensidades, se puede comparar la frecuencia en que el pronóstico y las observaciones coinciden en cada uno de los umbrales establecidos.

La ventaja de este tipo de evaluación es que permite detectar de forma inmediata la existencia de errores y el posible sesgo hacia alguno de los extremos. Una variante es

convertir cada una de las categorías en pruebas dicotómicas para facilitar el análisis de una gran cantidad de datos.

Verificación sobre la distribución espacial: La mayoría de las veces no basta con saber la ocurrencia temporal de los eventos y es necesario saber la tasa de precipitación, la distribución espacial y el lugar donde se producirá la precipitación.

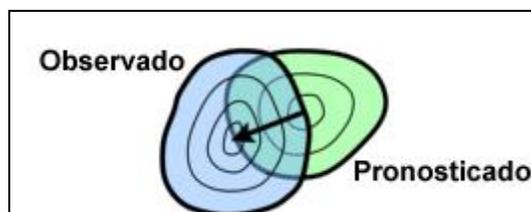


Figura 1.9: Diferencia en posición y estructura entre el campo observado y pronosticado, tomado de (Ebert y McBride 2000)

El método de evaluación consiste en identificar patrones en las observaciones y pronóstico e intenta calcular el error en la posición (Fig. 1.9), intensidad y estructura. Los tres parámetros mencionados forman parte de los errores sistemáticos más comunes en el pronóstico numérico del tiempo, un análisis de evaluación y corrección empleado con frecuencia, toma el principio descrito en esta evaluación, llamado Pronóstico Cuantitativo de la Precipitación (QPF por sus siglas en inglés) (Ebert y McBride 2000).

1.3 El interés de los pronósticos del tiempo en el Distrito Federal

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 mayor intensidad y frecuencia (Jáuregui 2000, Magaña y Neri 2007). 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 pronósticos y en el mejor de los casos a realizar una evaluación visual subjetiva.

Por ello, es necesario definir las capacidades del modelo a pronosticar, así como sus limitaciones para poder trabajar en mejoras del modelo para el Distrito Federal y sus alrededores, que se vean reflejadas en mayor confianza en la información y eventualmente en acciones preventivas como podrían ser las relacionadas con un Sistema de Alerta Temprana ante inundaciones. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha iniciado trabajos de diagnóstico de cómo hacer frente a este problema mediante información meteorológica mejorada (CONAGUA 2010).

1.4 Objetivos

Este trabajo tiene el objetivo de evaluar el pronóstico numérico del tiempo, específicamente el de la precipitación acumulada a 24 horas en el Distrito Federal, aprovechando que esta región cuenta con pronósticos del modelo MM5 con la misma configuración por más de tres años, y el reciente desarrollo de una base de datos de tasa de precipitación de alta resolución espacial y temporal, de forma que se pueda plantear en qué medida se puede mejorar el modelo.

Específicamente, el trabajo de tesis analiza la calidad de los pronósticos en el cálculo de:

- ❖ Los valores medios mensuales para temperatura, precipitación.
- ❖ Las predicciones en valores extremos.

La estructura de esta tesis está conformada por el capítulo 2, en él se describen los datos utilizado, así como la metodología empleada. En el capítulo 3 se presenta la discusión de los resultados obtenidos. El último capítulo de ofrecen las conclusiones y una propuesta de trabajo futuro

Capítulo 2

Datos y Metodología

2.1 Descripción de datos para el Distrito Federal

Un elemento fundamental para el análisis y evaluación de pronóstico numérico del tiempo es contar con información confiable 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 es integrada en bases de datos para ser llevada a mallas regulares, técnica conocida como reanálisis (Kalnay et. al. 1996, <http://www.esrl.noaa.gov>).

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), permitieron describir y analizar en escala temporal–espacial las condiciones meteorológicas para el Distrito Federal.

2.1.1 Descripción de datos de precipitación

Para la primera parte de este trabajo, se desarrolló una base de datos de precipitación horaria en una malla regular con resolución espacial de $0.036^\circ \times 0.036^\circ$ de latitud (aproximadamente $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$). Los datos de precipitación usados en el análisis se obtuvieron de la red de la SACM. La red pluviométrica de la SACM consta de 78 estaciones (Fig. 2.1), ubicadas en todo el Distrito Federal y municipios circundantes del Estado de México. El SACM cuenta con información histórica disponible al público desde

1993, con un intervalo de muestreo de cinco a diez minutos. Por la ubicación espacial de las estaciones y la continuidad temporal en los registros, la red permite caracterizar la evolución de tormentas sobre el Distrito Federal en cuanto a su distribución espacial, duración e intensidad.

El análisis de tasas de precipitación horaria abarcó el periodo 2003–2010. Para la construcción de la base se tuvo que decodificar la información de estaciones en superficie otorgada por el SACM, usando los archivos .PLU. Estos archivos son nombrados REAAMMDD.PLU, siendo RE un identificador del SACM, el resto son año, mes y día de la fecha de registro. En cada archivo se almacenan los registros en forma de pulsos de las 78 estaciones para el intervalo de tiempo de las 6 h del día actual a las 6 h del día siguiente.

La decodificación desarrollada permite convertir el registro en forma de pulsos a número de eventos o milímetros de lluvia; usando la relación, un pulso es igual 0.2 mm. Otro aspecto cuidado durante la decodificación fue determinar los periodos de falta de registro denotados en la base con el indicador -99.0.

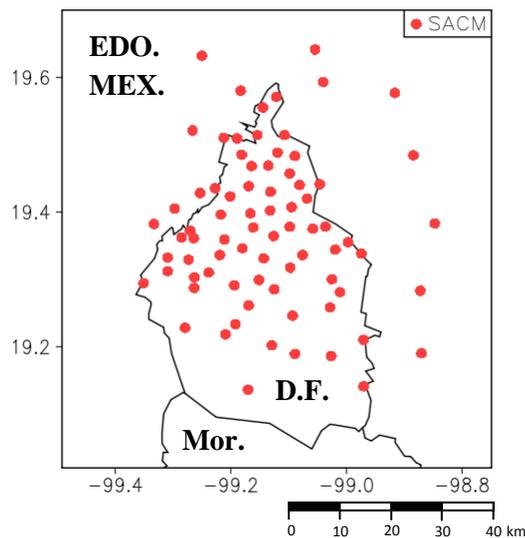


Figura 2.1: Estaciones pluviométricas del Sistema de Aguas de la Ciudad de México

Control de calidad datos precipitación

El control de calidad se realizó en diferentes etapas del análisis con el objetivo de detectar errores en los registros originales y en los archivos decodificados. Se verificó la existencia de los archivos de la SACM para todas las fechas a decodificar. Posteriormente se revisó archivo por archivo a fin de corroborar el orden de almacenamiento especificado obteniéndose como resultado:

- Se encontraron archivos dañados y faltantes para determinadas fechas. La solución fue solicitarlos nuevamente al SACM.
- Los nombres de algunos archivos presentaban diferencia en orden y uso de caracteres.
- En fechas que no se tuvo registro se construyó un archivo guía, con fines de facilitar la programación. (e.g. archivo RE090801.PLU)
- En algunos casos el contenido de los archivos por estación estaba repetido (e.g. archivo RE050720.PLU, estación 78), este problema se solucionó con la edición de los archivos.
- Después de decodificar y calcular tasas de precipitación horaria se encontraron valores fuera de los rangos esperados, resultado de incluir en la decodificación registros marcados como modo de prueba de la estación. Al eliminar los registros que presentaban esta característica los resultados mejoraron sustancialmente.
- En algunos casos las estaciones presentaban errores en el registro. Para solucionarlo se usó un filtro que eliminó la repetición de datos en estaciones que superaban los 30 registros en un minuto.

Finalmente la base decodificada se sometió a una verificación extra estableciendo un valor máximo de tasas de precipitación de 70 mm/h por estación, filtrando los valores que lo superaran. Para determinar la existencia del evento se usó información de estaciones cercanas localizadas dentro de un radio de 10 km, usando el criterio de si existían dos o más registros de magnitud similar a la estación de referencia, el valor era tomado como válido. En el caso de que no existieran estaciones cercanas, la verificación se realizó mediante investigación documental en periódicos e inventarios de desastres.

2.1.2 Descripción de datos de temperatura máxima (TMAX) y temperatura mínima (TMIN)

Los datos de temperatura usados en el análisis se obtuvieron de tres redes de observación: Estaciones climatológicas del SMN – Climate Computing (CLICOM, por sus siglas en inglés), esta base de datos incluye registros diarios de temperatura máxima, mínima, precipitación, etc. Las Redes de Meteorología y Radiación Solar (REDMET-SIMAT) y PEMBU-UNAM, proporcionan información de parámetros meteorológicos como temperatura, magnitud y dirección del viento. Dichas estaciones se encuentran ubicadas en el Distrito Federal y sus alrededores. El análisis de temperatura integró información de 457 estaciones de CLICOM, 15 de REDMET y 15 de PEMBU, conformando un total de 487 estaciones (Fig. 2.2).

El periodo de análisis 1986–2008 cuenta con información de las redes de CLICOM y REDMET, mientras la red PEMBU aportó información de 1996–2009.

La distribución espacial de las estaciones, la continuidad temporal de los registros y el uso de estimaciones de temperatura NARR, permiten representar la temperatura máxima (tmax) y mínima (tmin) sobre el dominio elegido para el análisis, facilitando la caracterización de ubicación, duración e intensidad de eventos de onda de calor y onda fría.

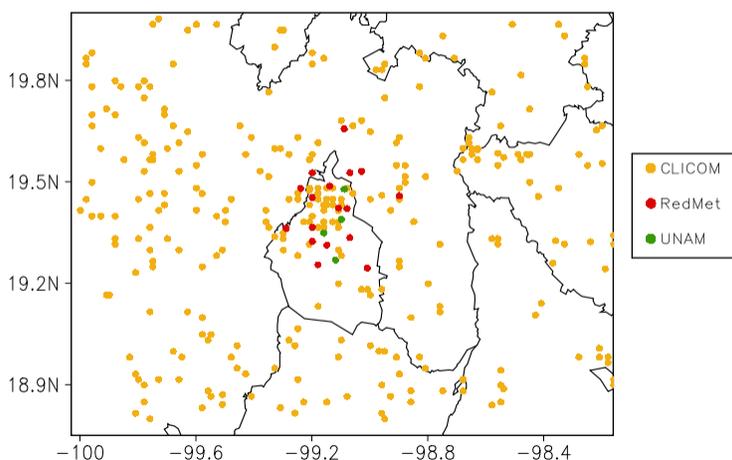


Figura 2.2: Estaciones usadas en el análisis de temperatura máxima y mínima

En la construcción de la base se integró la información diaria de las tres redes descritas. Por la forma de adquisición de los datos en cada red se utilizaron criterios distintos para su extracción:

Criterio CLICOM.- Se realizó la extracción de los valores diarios de tmax y tmin.

Criterio REDMET-PEMBU.- La construcción de la base para tmax y tmin se logró con la extracción de la información a partir de los registros horarios.

Control de calidad de los datos de temperatura máxima y mínima

El control de calidad se realizó con el fin de detectar errores en los registros originales y en los archivos generados, al integrar la información de las tres redes de observación se encontraron los siguientes resultados:

- Para los registros de REDMET y PEMBU el intervalo de muestreo de las estaciones no fue homogéneo durante el periodo.
- Se presentaban interrupciones en los registros y suponiendo que era falla en la estación, en cuyo caso se asignó la bandera de valor indefinido de -99.00.
- El orden con el que se presentaba la información variaba en la posición, lo que podría llevar a lecturas erróneas. Se corrigió el problema ubicando cada una de las variables en su posición correcta.
- Los espacios en blanco en el registro se asignaron como valores indefinidos.
- En algunos casos, las estaciones presentaban errores de captura en el registro, repitiendo información para el mismo tiempo y valor. Se solucionó con el uso de un filtro que eliminó la repetición de datos en cada una de las estaciones.

La base de datos se verificó usando la posición de las estaciones, y a partir de esta posición se definieron pequeñas regiones dentro del dominio con la finalidad de verificar congruencia en la magnitud de los datos. Por ejemplo, en un subdominio ubicada sobre el Distrito Federal se usó un filtro para temperatura máxima, fijando un valor umbral máximo para TMAX de 37° C, los resultados arrojaron para algunas estaciones registros con valores superiores a 40° C. Los registros que rebasaron el valor umbral máximo permitido fueron reemplazados por un valor indefinido; la última verificación fue considerar la posición en altura de la estación, usando el criterio, de que si la estación se encontraba a 2600 msnm o más la temperatura no debería superar los 29°C, de lo contrario el valor es considerado como indefinido.

2.1.3 Descripción de datos de viento

Los datos de viento usados para la construcción de la base fueron obtenidos de las redes de observación de REDMET y PEMBU descritas anteriormente, conformando 36 estaciones disponibles (Fig. 2.3), con periodos de registro de 1986 – 2008 para REDMET y la red PEMBU cuenta con información de 1996-2008.

Por la forma de adquisición de los datos en cada red, se utilizaron criterios distintos para su extracción:

Criterio PEMBU.- La extracción de los valores de viento se realizó tomando los datos horarios de la base. Una consideración hecha para realizar el análisis es la siguiente: El registro de las estaciones solo muestra el valor instantáneo de la magnitud y dirección del viento, por lo que no muestra una tendencia a lo largo de la hora de registro.

Criterio REDMET.- Se realizó la extracción de los valores horarios instantáneos de la variable de viento con la finalidad de usar un solo criterio en la generación de la base.

En el análisis de viento realizado fue necesario hacer la descomposición vectorial, a partir de la información de las estaciones (dirección y magnitud) que puede ser expresada como:

$$u = \gamma \sin(\theta)$$
$$v = \gamma \cos(\theta)$$

Donde γ es el valor de la magnitud y θ es la dirección del viento comprendida entre 0° y 360° .

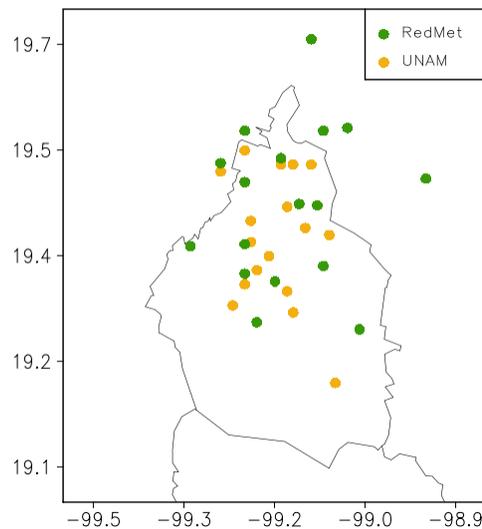


Figura 2.3: Estaciones empleadas para el análisis de viento

Control de calidad de los datos de viento

Al integrar la información de las dos redes de observación se encontraron los siguientes errores

- Para los registros de REDMET y PEMBU el intervalo de muestreo de las estaciones no fue homogéneo durante el periodo.
- Se presentaban interrupciones en los registros; asumiendo que se debía a una falla en la estación se les asignó la bandera de valor indefinido de -99.00.
- A los espacios en blanco en el registro se les asignó el valor indefinido.

La verificación consistió en usar el valor de la magnitud del viento a partir de información histórica y se determinó el valor umbral de 25 m/s como tope de intensidad para viento en superficie sobre el Distrito Federal. El uso del filtro sobre cada una de las

estaciones permitió encontrar datos que superaban el valor límite. Para el registro de la dirección no se utilizó control de calidad al no existir un criterio definido para detectar y discriminar valores anómalos en la base.

2.2 Descripción de los datos de estimación de precipitación por satélite CMORPH

El uso de productos derivados por la percepción remota ha ido en aumento por la necesidad de conocer las condiciones atmosféricas de un sitio en forma regional; a diferencia de los instrumentos de medición meteorológica que solo proporcionan información puntual, las estimaciones satelitales han permitido tener cobertura en todo el planeta e incluso en regiones no instrumentadas. Desde el lanzamiento del primer satélite meteorológico en la década de 1970 (Kidd 2001) han existido una serie de programas enfocados a la estimación de precipitación. El avance en técnicas de teledetección y el desarrollo de plataformas con mayor resolución espacial, han permitido crear productos de alta resolución espacio-temporal de gran calidad. A pesar del desarrollo logrado, las estimaciones de precipitación siguen siendo insuficientes en escala temporal y espacial, para el estudio de procesos de mesoescala relacionados con el tiempo atmosférico. Las principales limitantes de las estimaciones de alta resolución espacial son: Al ser productos derivados de estimaciones de resolución media ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), que generalmente tiene un intervalo de observación de tres horas, presenta problemas al estimar tasas horarias de precipitación, en cuanto a la magnitud de la intensidad registrada, la posición espacial del patrón, la duración y área del evento de precipitación, también muestra dificultad para estimar a escalas horarias.

El Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional de Océano y Atmósfera (NOAA, por sus siglas en Inglés), ha desarrollado desde diciembre de 2002, estimación de precipitación mundial con resolución temporal de 30 minutos y resolución espacial de 0.088° tanto en latitud como en longitud (Joyce et al. 2004). El algoritmo desarrollado por este centro para hacer la estimación es denominado *morphing*, se basa en hacer un análisis de las observaciones de microondas (en esta primera etapa se crea un producto llamado QMORPH disponible en la página cuatro horas después de la medición), el paso siguiente es propagar la información en el espacio con vectores de movimiento generados por las observaciones de infrarrojo en satélites geoestacionarios (Joyce et al. 2004). La información recabada por los satélites permite determinar la estructura, evolución y temperatura del tope de cuerpos de nubes. Finalmente, el algoritmo hace un análisis retrospectivo para determinar coherencia y consistencia en las estimaciones de precipitación, la resolución del primer producto derivado del algoritmo cuenta con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, mientras que los productos de resolución más alta son obtenidos a partir de una interpolación.

Para el presente trabajo se decidió usar las estimaciones descritas por la continuidad en los registros y la facilidad de obtener la información. La construcción de los campos preliminares consistió en calcular tasas de precipitación acumulada horaria sobre el periodo 2003–2010. Por la cantidad de estaciones disponibles fue factible usar una resolución aproximada de $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ en el análisis, el dominio fue determinado en función de la distribución espacial de las estaciones (Fig. 2.1).

2.3 Descripción de los datos de reanálisis NARR

La necesidad de contar con registros consistentes, completos y por periodos prolongados de las componentes del clima, incluyendo la atmósfera, océanos y la superficie terrestre, ha llevado a generar información a través de modelos, observaciones y análisis estadísticos, creando aproximaciones del estado de la atmósfera en superficie y altura. La calidad de los análisis realizados mejora con la integración de información de diversas fuentes de datos (estaciones en superficie, radiosondeos, mediciones en aviones, barcos, satélites, etc.), que en conjunto con sistemas de asimilación de datos, permite integrar toda esta información en el dominio atmosférico del modelo usado, para obtener el estado más próximo de la atmósfera para un instante; a este proceso se le ha llamado reanálisis.

Contar con datos de reanálisis ha permite realizar estudios de mecanismos físicos con impacto a escala global y regional, incluyendo variaciones climáticas como las de El Niño/Oscilación del Sur. No se debe perder de vista que al utilizarse un modelo se tienen limitantes, y por ello la mayoría de los datos de reanálisis globales y regionales presentan un alto grado de confianza en el hemisferio norte, específicamente en latitudes medias; pero hacia el ecuador la confianza es baja, porque el modelo usado no cuenta con la física y dinámica que describen a los fenómenos atmosféricos en latitudes tropicales.

En el análisis realizado se utilizaron datos de Reanálisis Regional para América del Norte (NARR, por sus siglas en inglés). Este es el primer reanálisis regional desarrollado con alta resolución espacial y temporal (Mesinger 2006). Cuenta con registros desde 1979 a la fecha, y la resolución usada es aproximadamente 21 km, la información es presentada en archivos diarios con intervalo a cada 3 h, con la posibilidad de desplegar 187 variables en superficie y en niveles mandatorios de presión e incluso niveles adicionales para un total de 29 niveles en la vertical. En el desarrollo de este tema se usaron las variables de temperatura a 2 m de la superficie y las componentes u y v de viento a 10 m, para el periodo de 1986 a 2009.

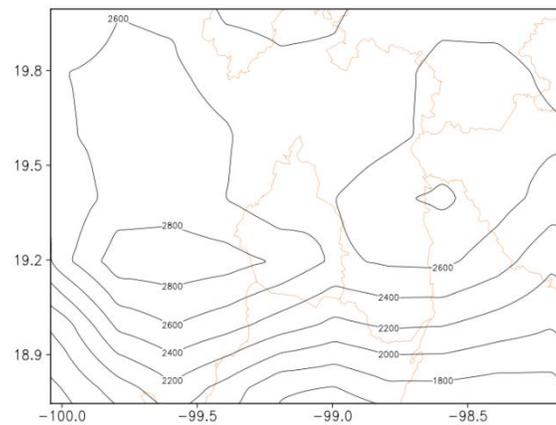
En el análisis de temperatura se decidió trabajar con temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN), siendo necesario extraer la TMAX y TMIN diaria en un periodo comprendido entre las 8 h del día anterior a las 8 h del día actual, con la finalidad de

homogeneizar el criterio para determinar la TMAX y TMIN usado por el Servicio Meteorológico Nacional, posteriormente se realizó una corrección por altura, usando un gradiente adiabático de 0.6° C/km. Por la densidad de estaciones ubicada en el dominio, se decidió crear una base de $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ sobre el dominio del Distrito Federal.

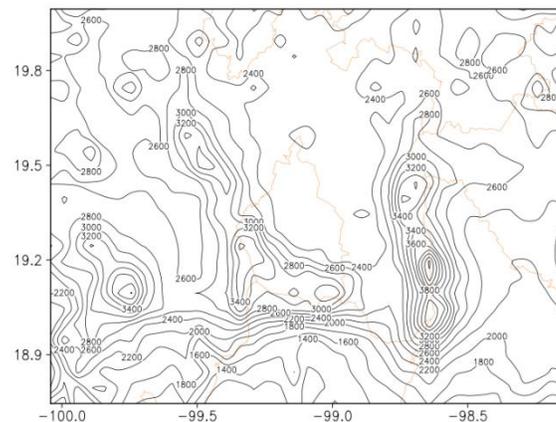
2.4 METODOLOGÍA

2.4.1 Corrección de campos de temperatura máxima y mínima

Después de haber realizado la extracción de TMAX y TMIN, se observó el campo de temperatura no concordaba con la orografía existente en el Distrito Federal (Fig 2.4a) y por conocimientos básicos de Meteorología, se sabe que para el campo de temperatura la componente orográfica es uno de los elementos moduladores y determinantes para la forma y distribución del campo.



(a)



(b)

Figura 2.4: Elevación (a) topografía del modelo NARR, (b) topografía de referencia “real” (Smith et al. 1997)

En el ajuste de temperatura se usó el gradiente para una atmósfera estándar (2.1.1) derivado de la ecuación de estado y la ecuación hidrostática, donde T es la temperatura, θ es la temperatura potencial, siendo la temperatura que alcanzaría una parcela de aire seco a una temperatura y presión dada, si se comprime o expande adiabáticamente a una presión de referencia, entendiendo que un proceso adiabático es aquel donde existe intercambio de calor con el medio, C_p es el calor específico a presión constante, g es la gravedad.

$$\frac{T}{\theta} \frac{\delta\theta}{\delta z} = \frac{\delta T}{\delta z} + \frac{g}{c_p} \quad (2.1.1)$$

Por la ubicación espacial de los campos a corregir (en superficie), se debe considerar el comportamiento de la temperatura potencial dentro de la Capa Límite Planetaria. Esta capa está sujeta a la influencia de los procesos térmicos y mecánicos que ocurren cerca en la superficie terrestre, detonando mecanismos de mezcla turbulenta en la vertical, los cuales están determinados en gran medida por la variación diurna. Como resultado de estos procesos se obtiene una distribución homogénea de las propiedades dentro de la región de turbulencia (capa mezclada). Por esta razón se dice que el viento, humedad y temperatura potencial presentan un comportamiento uniforme dentro de la Capa Límite Planetaria (Stull 2000). Bajo la consideración que la temperatura potencial sea uniforme en los niveles bajos de la atmósfera (2.2.2), el gradiente adiabático seco queda expresado como el grado de disminución de la temperatura en función de la altura (Holton 2004).

$$\Gamma_d \equiv -\frac{\delta T}{\delta z} \quad (2.1.2)$$

Por lo descrito, se decidió el uso del gradiente para una atmósfera estándar de 0.6°C por cada 100 m, más cercano a una adiabática húmeda, que en conjunto con las diferencias en elevación (Fig. 2.5) entre la topografía denotada como real (datos tomados del Instituto de Oceanografía de la Universidad de California, San Diego) y la topografía de NARR (Fig. 2.4b) lleva a un campo preliminar de temperatura.

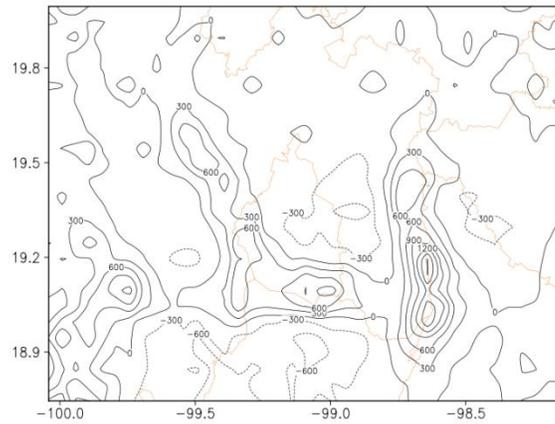
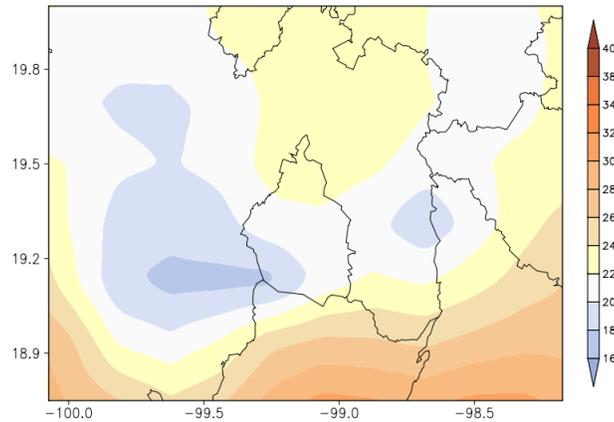


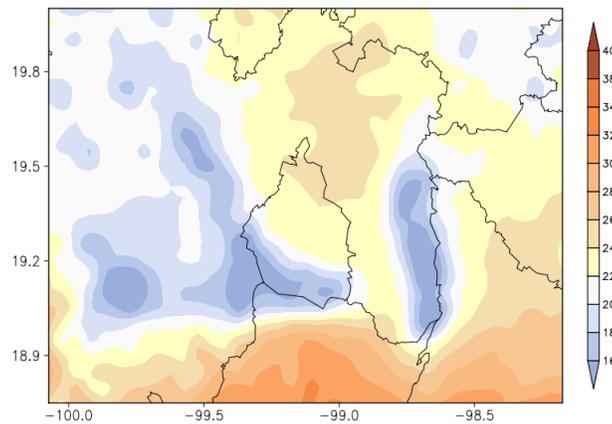
Figura 2.5: Diferencia de elevación sobre el nivel medio del mar [m] entre datos de topografía para el modelo NARR y datos de mayor resolución espacial interpolados a la resolución de NARR

Finalmente la corrección $Temp_c$ (Fig. 2.6b) queda descrita (2.1.3) por la temperatura de la estimación por satélite NARR $Temp_{NARR}$ (Fig.2.6a) menos el producto entre el gradiente teórico Γ_d y la diferencia de elevaciones Δz . Obteniendo un campo ajustado a la topografía del Distrito Federal, con valores adecuados para ser el campo preliminar de las variables de TMAX y TMIN en la asimilación de datos.

$$Temp_c = Temp_{NARR} - \Gamma_d \Delta z \quad (2.1.3)$$



(a)



(b)

Figura 2.6: Corrección de campo de temperatura (a) campo original NARR y (b) campo corregido

2.4.2 Esquema de asimilación de datos, análisis objetivo tipo Cressman

Después de construir las bases de datos y someterlas al control de calidad descrito, se procedió a llevar la información de estaciones a malla regular, mediante un proceso de interpolación de datos de estaciones ubicadas en forma irregular a un arreglo regular en forma de malla, mediante el método de asimilación de datos conocido como esquema de análisis objetivo por correcciones sucesivas (Cressman 1959). Originalmente el método de análisis fue propuesto por Bergthorsson y Döös en 1955, pero para 1959 el esquema fue mejorado por Cressman para las componentes u y v del viento (Krishnamurti 1975). Krishnamurti en 1975, realizó modificaciones y generalizó lo planteado por Cressman para cualquier variable meteorológica que se deseara, proponiendo incluso hacer uso del análisis objetivo para realizar correcciones a estimaciones satelitales de variables meteorológicas, obteniendo resultados satisfactorios (Mitra et al. 2003). Por lo anterior, en este trabajo se usó el esquema de correcciones sucesivas propuesta por Krishnamurti para estimaciones satelitales de precipitación, temperatura máxima, mínima y viento.

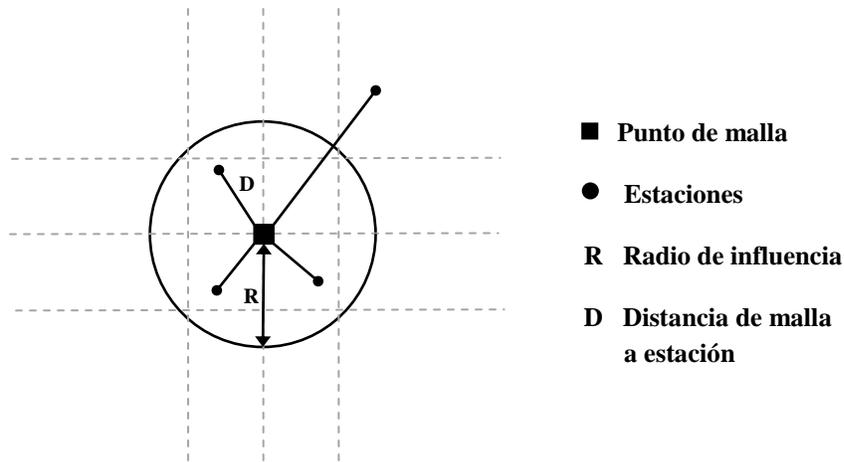


Figura 2.7: Radio de influencia en el esquema de análisis objetivo tipo Cressman

La corrección de la estimación satelital considera un campo preliminar CMORPH o NARR (Fig. 2.8a y Fig. 2.6b), espaciado regularmente de alguna variable meteorológica x_{gij}^v en la iteración v , para el punto de malla (i,j) . Los pesos para los promedios de las correcciones están basados en el inverso del cuadrado de la distancia y dependen directamente de los radios de influencia, R , elegidos (Fig. 2.7). Se tienen dos casos generales para realizar la corrección: El primer caso se considera cuando las estaciones están ubicadas fuera del radio de influencia y es necesario calcular el valor del campo preliminar en la ubicación de una estación (2.2.1), donde i, j representan el número de nodos en dirección zonal y meridional respectivamente y w es un factor de peso en función de la distancia (2.2.2) descrita por la fórmula de interpolación de Lagrange para 9 puntos en el esquema de asimilación. Resulta importante tener conocimiento sobre la distancia media entre estaciones, porque determinará el número de iteraciones a realizar y el tamaño de los radios de influencia para la corrección del campo, influyendo en la estabilidad de las correcciones.

$$x_{g_s}^v = \sum_{\substack{j=J+1 \\ i=I+1 \\ i=I-1 \\ j=J-1}} w_{ij} x_{g_{ij}}^v \quad (2.2.1)$$

$$w_{ij} = \prod_{\substack{k=I+1 \\ k=I-1 \\ K \neq I}}^{k=I+1} \frac{(x - x_k)}{(x_I - x_k)} \cdot \prod_{\substack{l=J+1 \\ l=J-1 \\ l \neq J}}^{l=J+1} \frac{(y - y_l)}{(y_J - y_l)} \quad (2.2.2)$$

El segundo caso considerado para estaciones localizadas dentro del radio de influencia (2.2.3), está definida por el valor de la variable meteorológica en algunas de las iteraciones (inicial o de corrección) y el factor de peso (2.2.4) estará determinado por el inverso del cuadrado de la distancia, involucrando la longitud del radio de influencia y la distancia (2.2.5) entre el punto de malla y la estación.

$$x_{g_s}^v = \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ i=L}}^{j=M} w_{ij} x_{g_{ij}}^v}{\sum_{\substack{i=L \\ j=1}}^{i=L} w_{ij}} \quad (2.2.3)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} \frac{R^2 - d^2}{R^2 + d^2} & d < R \\ 0 & d \geq R \end{cases} \quad (2.2.4)$$

R = radio de influencia.

d = distancia.

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (2.2.5)$$

La diferencia entre el valor actual en cada iteración x_s y el valor interpolado x_{g_s} en una estación (2.2.6) permite obtener un valor de corrección para el nodo de la malla en la iteración $(v+1)$ (2.2.7), nuevamente aparece un factor de peso w_s^v (2.2.8) donde β es una función de ponderación de tiempo (2.2.9), γ es un factor de confianza tomado en función de

la variable meteorológica en cuestión (Krishnamurti 1975) y α es una constante elegida por el tiempo de separación en las observaciones.

$$E_s^v = X_s^v - x_{g_s}^v \quad (2.2.6)$$

$$c_{ij}^{v+1} = \frac{\sum_s w_s^v E_s^v}{\sum_s w_s^v} \quad (2.2.7)$$

$$w_s^v = w_{ij}^v \beta \gamma \quad (2.2.8)$$

$$\beta = e^{-\alpha(\Delta t)^2} \quad (2.2.9)$$

La corrección en forma iterativa, es realizada calculando el factor de suavizamiento (2.2.10), determinado por la longitud del radio de influencia R y la distancia de la estación al punto de malla D, involucrando el centro de gravedad c_g del área de influencia estimada (2.2.11).

$$s = \frac{R - d}{c_g} \quad (2.2.10)$$

$$c_g = \frac{R}{2} \quad (2.2.11)$$

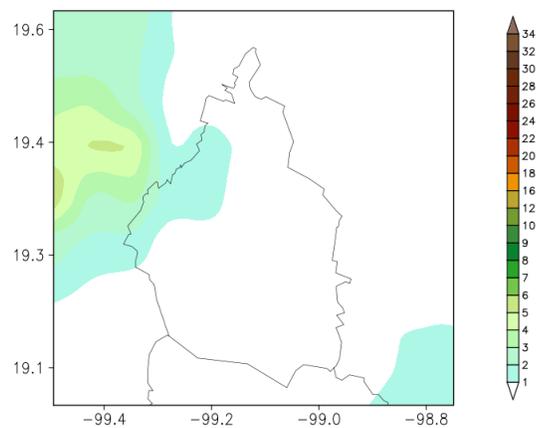
Finalmente la estimación (2.2.12) para la iteración $(v + 1)$, queda expresada por la variable meteorológica en la iteración actual más la multiplicación entre los factores de peso y de suavizamiento para cada punto de malla.

$$x_{g_{ij}}^{v+1} = x_{g_{ij}}^v + s c_{ij}^{v+1} \quad (2.2.12)$$

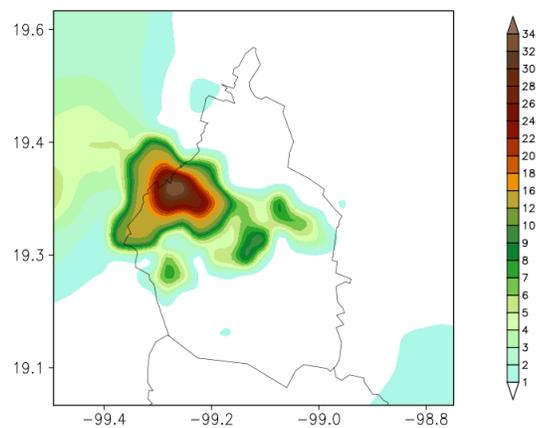
La elección del número de iteraciones y radios de influencia a utilizar, está determinada para cada variable meteorológica en función de la distancia media entre estaciones y la estabilidad del algoritmo. Respecto a las iteraciones, en la literatura se encuentra que no existe una regla para determinar el número de ellas, aunque se ha probado el algoritmo de Krishnamurti con cuatro iteraciones, resultando un buen desempeño. En el desarrollo de este trabajo, cuatro fueron las iteraciones usadas, con radios de influencia de

10, 8 y 4 km repitiendo el radio de cuatro kilómetros por estabilidad del algoritmo. La diferencia entre el algoritmo usado y el planteado por Cressman en 1959, es la incorporación de la información disponible fuera del radio de influencia permitiendo obtener un análisis más robusto.

El algoritmo descrito tuvo la capacidad de detectar y remover datos erróneos, además pudo generar campos corregidos y consistentes con la información de las estaciones (Fig. 2.8b). Permitiendo ajustar la posición espacial del patrón, la duración del evento, la delimitación de la zona de la tormenta y corregir el valor de la intensidad de precipitación.



(a)



(b)

Figura 2.8: Corrección del campo de precipitación para las 17 h del 12 septiembre de 2007, (a) campo preliminar CMORPH, (b) corrección mediante esquema análisis objetivo tipo Cressman

La verificación de la asimilación consistió en tomar una muestra independiente, teniendo como referencia la estación meteorológica de la Escuela Nacional Preparatoria N° 4 para el mes de agosto del 2008 de donde tomó la serie de tiempo, para la variable de precipitación. Además se extrajo la serie tiempo del punto de malla más cercano a la estación de ENP N°4 del campo preliminar y corregido. La verificación se basó en comparar las tasas de precipitación horaria del campo preliminar y la muestra independiente (Fig. 2.9a), mostrando que la estimación por satélite CMORPH es capaz de reproducir el patrón de lluvia en escala horaria pero la magnitud es subestimada. Después de realizar la asimilación (Fig. 2.9b), la comparación arroja que el campo corregido (CMORPH + SACM) mantiene y define el patrón de lluvia a lo largo del mes y, lo más importante corrige, la intensidad de la tasa de precipitación permitiendo obtener campos consistentes cercanos al valor de estación. Utilizar esta técnica tiene como limitante el amortiguamiento de los valores extremos de precipitación, con una variación en un rango de 2 a 5 mm, la cual depende del número de estaciones situadas dentro del radio de influencia, el radio de influencia mismo y factores fuera del alcance del algoritmo, como la distribución espacial (área de afectación) de la tormenta y la capacidad de los algoritmos para estimar precipitación en regiones de orografía compleja.

En regiones donde no se contó con información de estaciones como en Amecameca, la verificación se realizó comparando el campo preliminar y el asimilado para mostrar la estabilidad del algoritmo al realizar la corrección, resultando que, al no existir estaciones para corregir, no se debe perturbar el campo preliminar y por tanto en el campo asimilado debe parecer la estimación por satélite sin perturbaciones (Fig. 2.9c).

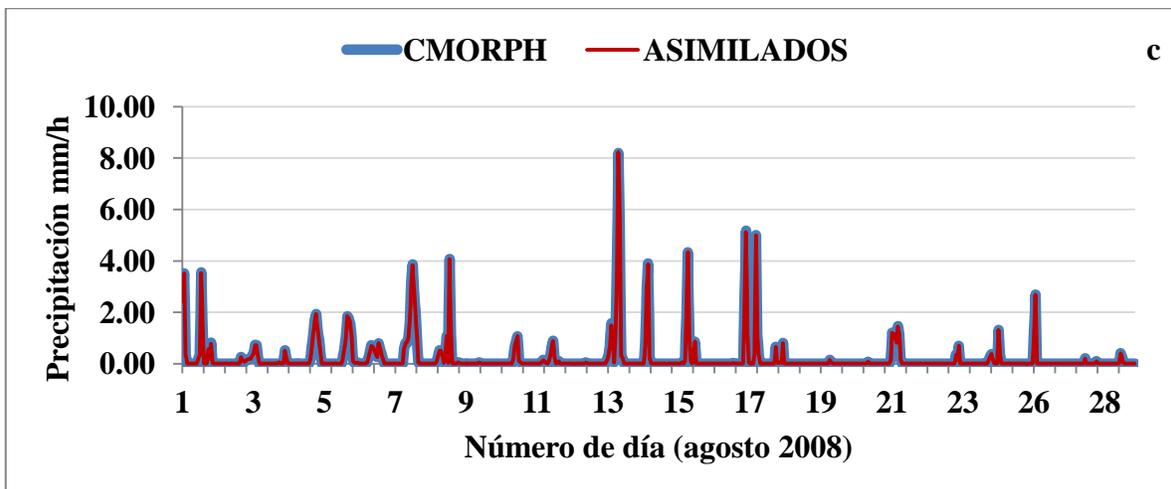
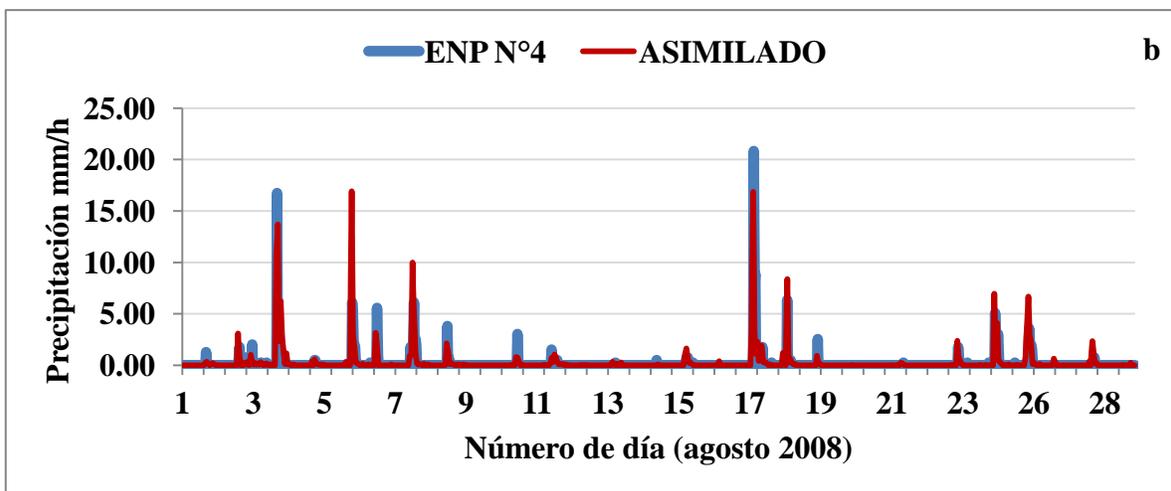
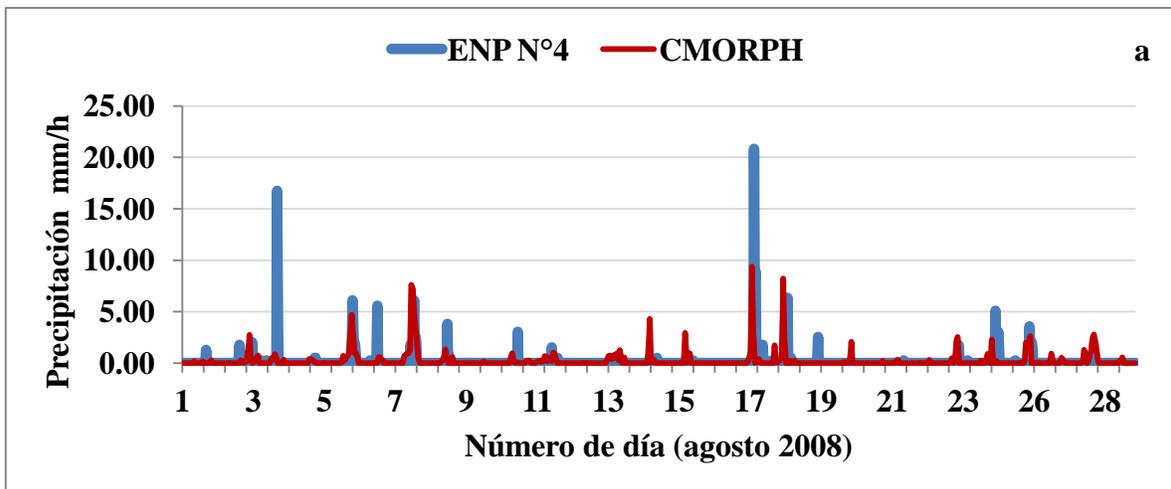


Figura 2.9: Verificación para la variable de precipitación después de su corrección, usando el análisis objetivo tipo Cressman. Comparación entre: (a) ENP N° 4 y campo preliminar sin corregir, (b) ENP N° 4 y asimilación, campo corregido y (c) CMORPH y asimilación sobre Amecameca

Finalmente se realizó la comparación entre los datos de estación y la base asimilada para determinar la capacidad de capturar eventos de precipitación en periodos de horas y días (Fig. 2.10). La base construida muestra gran habilidad para capturar y describir eventos de precipitación. Comparando la estación de referencia y la base asimilada, presentan patrones similares, mostrando continuidad de la información y permitiendo una clara descripción de los eventos, esto resulta de gran importancia para estudiar la evolución de tormentas sobre el Distrito Federal.

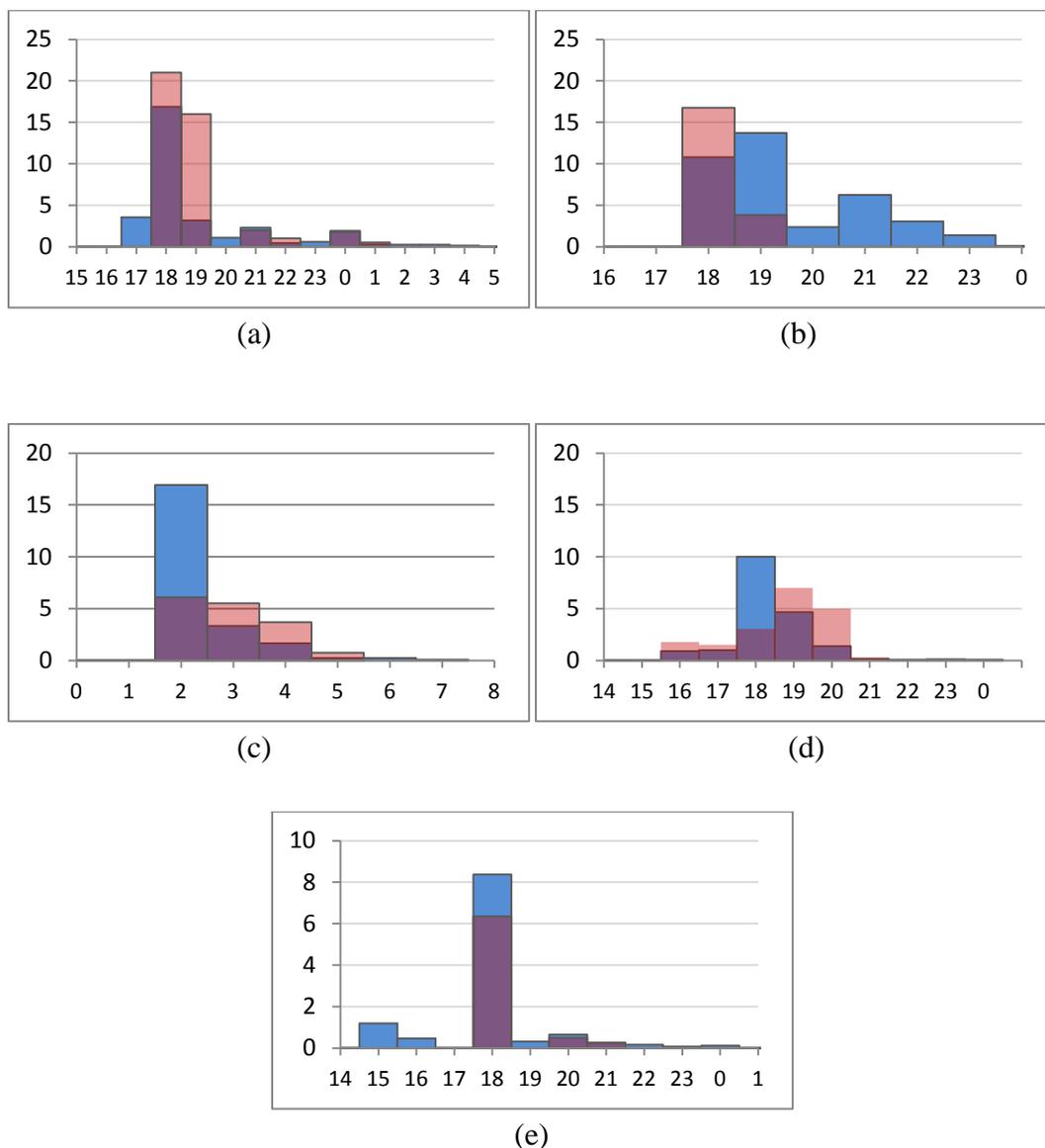


Figura 2.10: Duración e intensidad de eventos de precipitación entre ENP N°4 (barras color rosa) y base corregida (barras color azul), el eje de ordenadas representa mm/h y el eje de abscisas corresponde a horas para cada una de las siguientes fechas (a) 17-18 de agosto, (b) 3-4 de agosto, (c) 5-6 de agosto, (d) 7-8 de agosto y (e) 18 y 18 agosto

2.4.3 Salidas MM5

En el desarrollo de este trabajo se usaron las salidas del pronóstico operativo del MM5 para el altiplano central, comprendiendo el periodo de febrero del 2008 a septiembre del 2010. Para los pronósticos emitidos a 48 h el modelo se corría de forma rutinaria inicializando el modelo a las seis de la mañana.

El periodo considerado se debe a que a partir de 2008 las corridas se realizaron asimilando la condición inicial con información de estaciones en superficie (PEMBU y SMN) y radiosondeos disponibles al instante de realizar las simulaciones. Las corridas se realizaban usando dos dominios (Fig. 2.11): el dominio madre de 221×91 nodos (a resolución aproximada de 24 km), el dominio anidado de 30×30 (con nodos con resolución de 9×9 km). El uso de suelo empleado en las corridas es de 24 categorías bajo la nomenclatura del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la topografía usada es la descrita a 30 segundos.

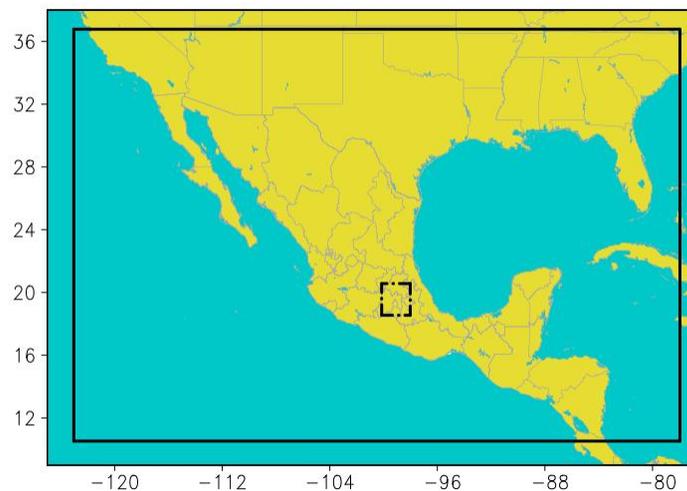


Figura 2.11: Dominio del pronóstico operativo; la línea continua representa dominio madre y línea discontinua al dominio anidado para el pronóstico del Distrito Federal

Capítulo 3

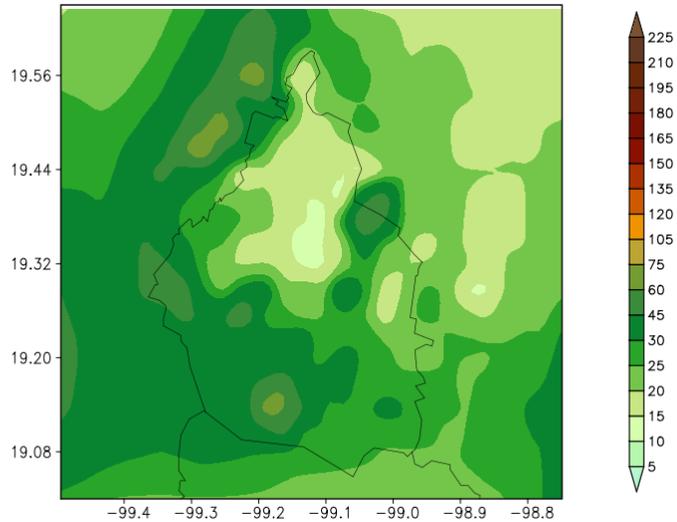
Resultados

3.1 Breve síntesis del clima y condiciones de tiempo para el Distrito Federal

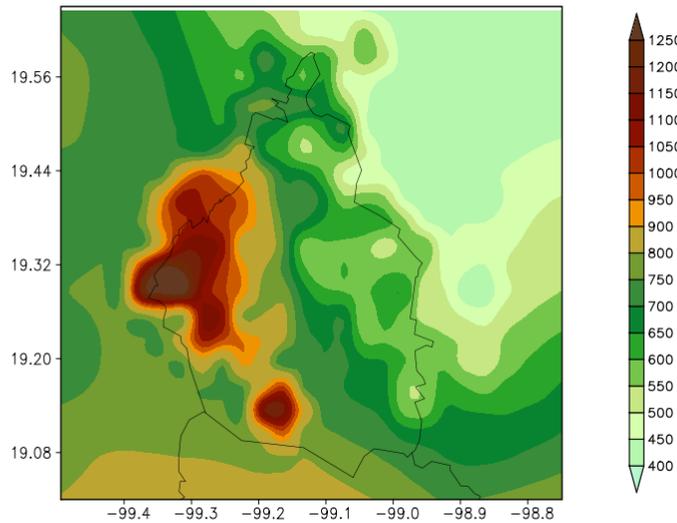
Contar con información meteorológica a escala regional permite realizar estudios de procesos físicos en la atmósfera, en este caso de mesoescala. La asimilación de datos es fundamental para establecer los valores de las variables meteorológicas en arreglos de malla (matrices). El proceso de asimilación permitió integrar información de estaciones con estimaciones de satélite, generando bases consistentes y de calidad para el Distrito Federal y el área Metropolitana, resultando de utilidad para la evaluación del pronóstico numérico del tiempo. Las variables de interés principal en el pronóstico del tiempo son la precipitación y la temperatura.

3.1.1 Precipitación

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 (Fig. 3.1a). La precipitación en verano para el D.F. está modulada en gran medida por el paso de ondas del este, huracanes, con aporte de flujo de humedad proveniente del Golfo de México y en menor medida del Pacífico. La actividad convectiva local está modulada, entre otros factores por el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (Magaña 2010). El resto de los meses la precipitación se presenta por periodos intermitentes a consecuencia de sistemas de escala sinóptica como son frentes y nortes (Fig. 3.1a).



a



b

Figura 3.1: Valor medio de precipitación acumulada mensual (en mm) en el periodo 2003–2010, (a) invierno (diciembre–febrero), (b) verano (mayo–octubre). NOTA: Se usaron diferentes escalas para una mejor representación

La distribución de lluvia en la cuenca donde se encuentra el Distrito Federal está modulada por la componente orográfica. Anualmente la precipitación oscila en un rango de 700 a 1200 mm con una variabilidad interanual de $\pm 30\%$ (Jáuregui 2000) modulada por procesos de baja frecuencia como ENOS. La región poniente y suroeste del D.F., ubicada entre la Sierra de las Cruces y la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, es la que más precipitación recibe durante el verano. Una muestra del efecto orográfico se logra cuantificando la ocurrencia de tormentas con un valor igual o superior a 20 mm/h (Fig.

3.2a), encontrando los valores máximos en las regiones de mayor elevación para el Distrito Federal. De acuerdo con Jáuregui en 2000 y Pérez en 2004, ha habido un incremento de precipitación extrema en las últimas décadas en la estación de Tacubaya (Fig. 3.2b) y probablemente en gran parte del Distrito Federal. Los resultados del análisis muestran para el periodo de 2003 a 2010 valores alrededor de 20 eventos por año con condiciones de precipitación extrema de más de 20 mm/h para la parte poniente.

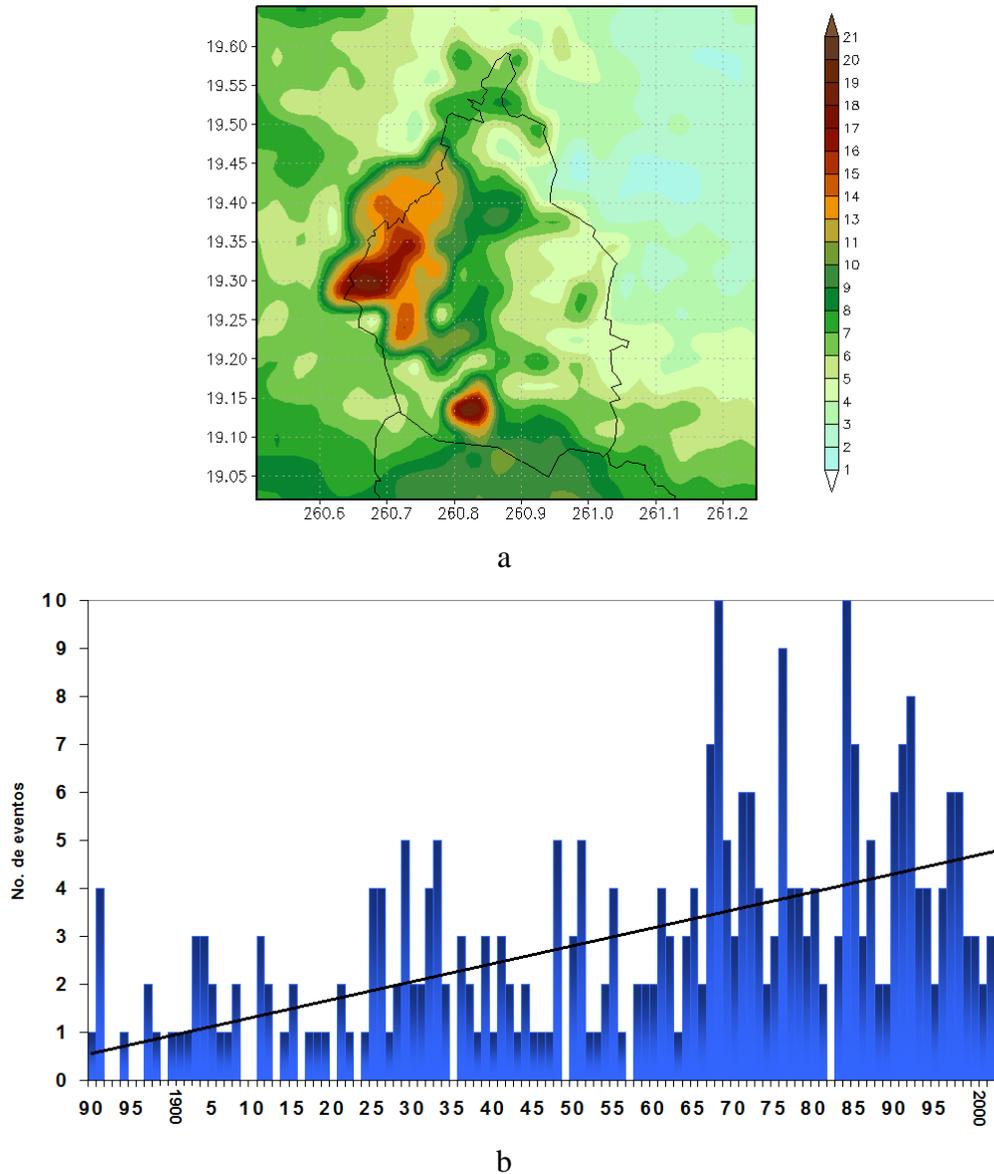


Figura 3.2 (a) Eventos de precipitación mayores a 20 mm/h en el periodo de 2003–2010, (b) número de eventos extremos de precipitación (lluvias mayores a 30mm/día) en la estación de Tacubaya de 1890–2003. Tomada de (Pérez 2004)

“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 (Fig. 3.3) 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” (Magaña 2007).

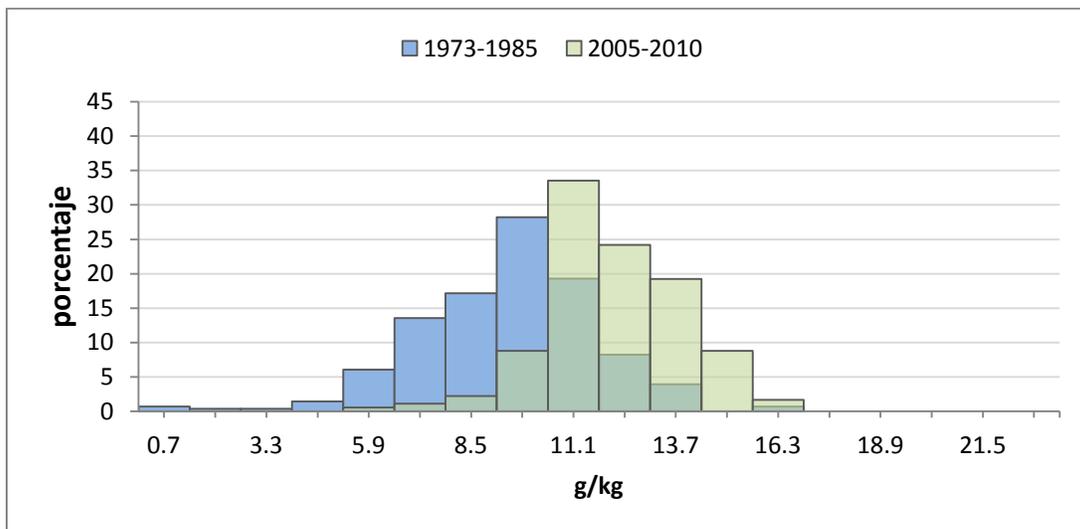
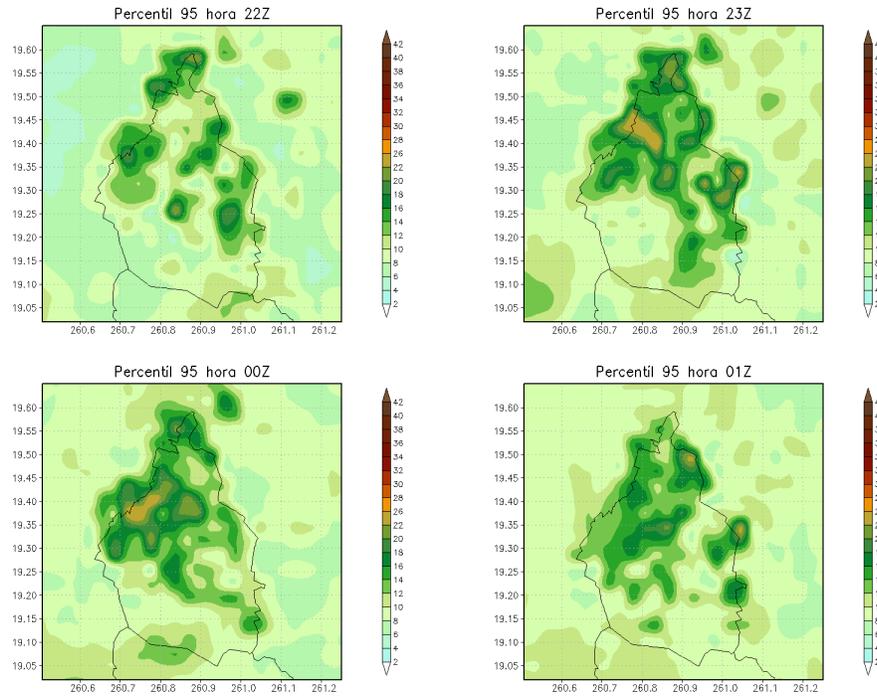
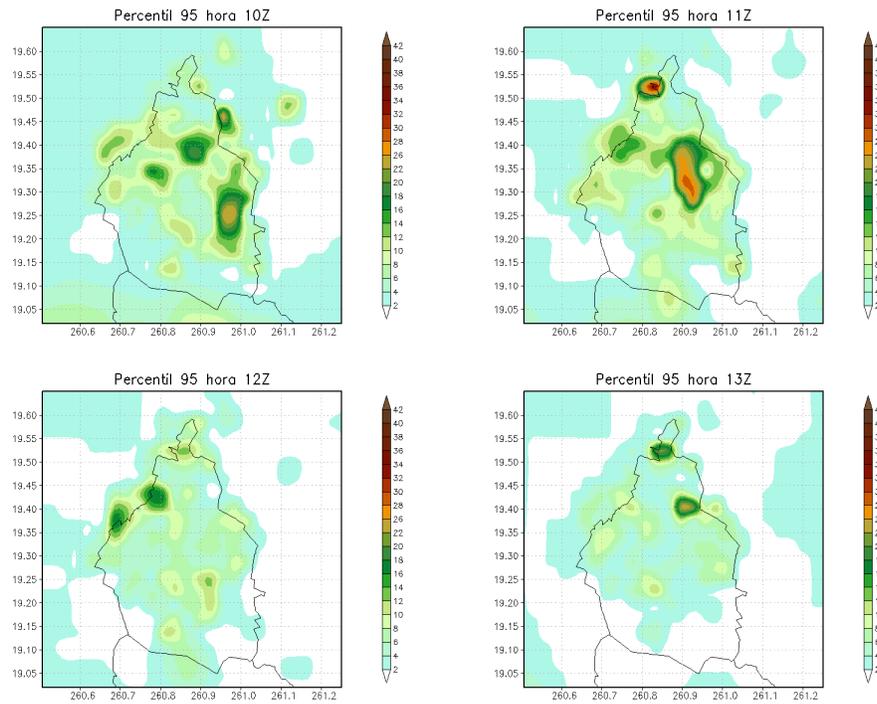


Figura 3.3: Histogramas de humedad específica (en g/kg) para el aeropuerto de la Ciudad de México. La fuente de datos del periodo 1973–1985 fue el radiosondeo y para el periodo 2005–2010 la fuente fue el informe METAR. El cambio en la distribución de la humedad específica se debe principalmente al cambio de uso de suelo ocurrido en los alrededores del aeropuerto.

La ocurrencia de tormentas en verano con mayor intensidad sobre el Distrito Federal, se da hacia las horas de la tarde, marcado por el régimen de ciclo diurno (Fig. 3.4a), resultado de la interacción del viento dominante del este con la orografía, que sumado al calentamiento a lo largo del día y la cantidad de humedad en la atmósfera, entre otros factores, detona procesos convectivos locales asociados a inestabilidades atmosféricas. Lo anterior puede dar origen a tormentas con tasas de precipitación superiores a 20 mm/h que constituyen un peligro y que en décadas recientes son de ocurrencia más frecuente en la parte poniente del Distrito Federal. Por otra parte, existe un periodo para eventos con tasas de precipitación menos intensa pero con una recurrencia relativamente alta, el cual ocurre en las primeras horas del día (Fig. 3.4b) en la zona oriente y decae hacia medio día.



a



b

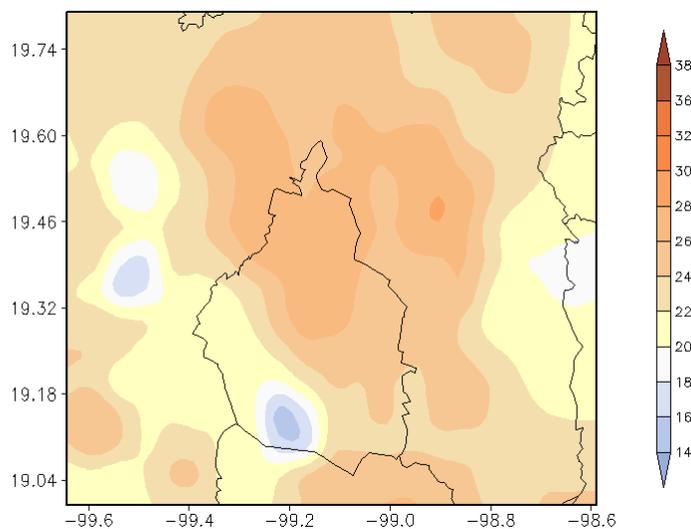
Figura 3.4: Percentil 95 de la variable de precipitación horaria, muestra el ciclo diurno para el Distrito Federal (a) lluvias vespertinas y de mayor intensidad, (b) lluvias matutinas de baja intensidad y frecuentes

3.1.2 Temperatura

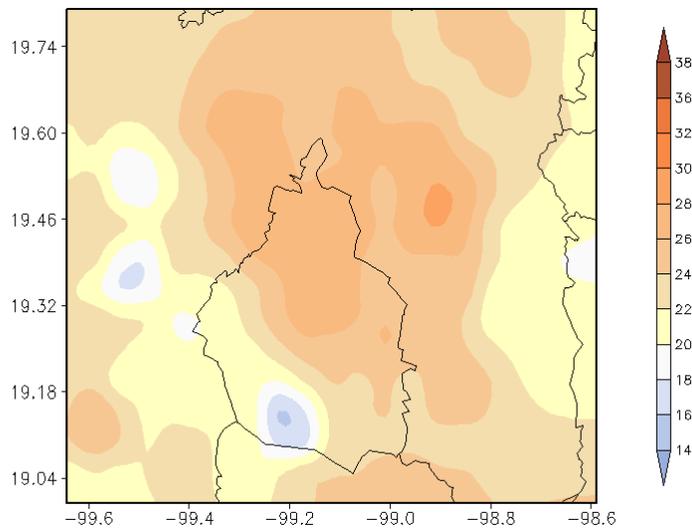
La temperatura en el Distrito Federal está determinada en forma general por la orografía, con mayores temperaturas en las partes bajas y menores en las partes altas. La temperatura media anual oscila entre los 15° y 17°C (Jáuregui 2000). La temperatura presenta un ciclo anual, modulando dos etapas que son reflejadas claramente en la variable de temperatura máxima (Fig. 3.5 a-b) y temperatura mínima (Fig. 3.8 a-c), a consecuencia de la cantidad de humedad disponible (nubosidad). La construcción de la base de temperatura máxima y mínima para el periodo 1986–2009, permitió calcular tendencias de comportamiento de estas variables en años recientes.

3.1.2.1 Temperatura máxima

La temperatura máxima presenta su mayor valor para los meses de abril (Fig. 3.5a) y mayo (Fig. 3.5b), mostrando en gran medida que la mancha urbana es un factor que determina los valores máximos en la parte centro, norte del Distrito Federal y en la región noreste sobre Texcoco, llegando en el mes de mayo a valores cercanos o por arriba de 30°C.



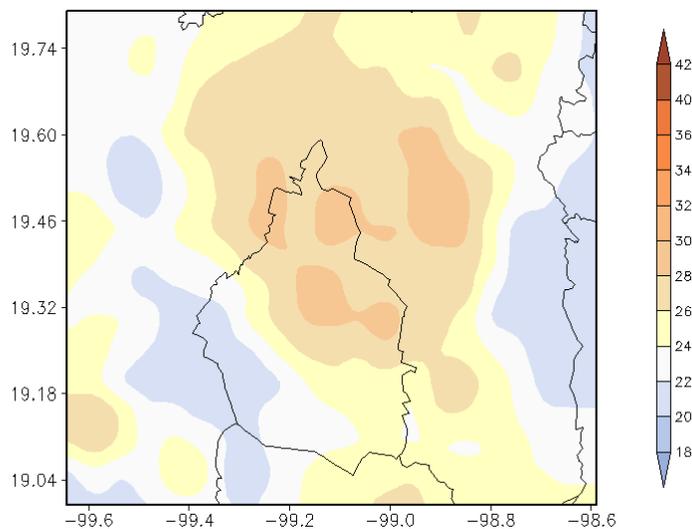
a



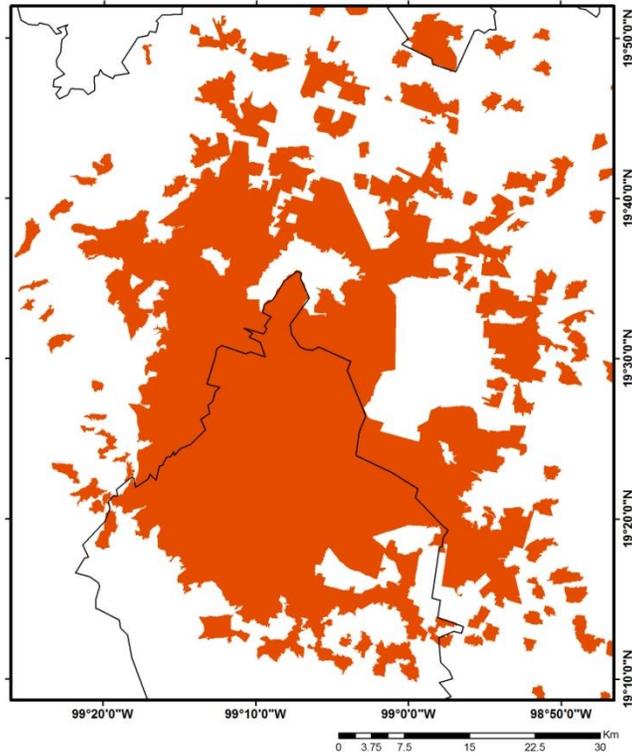
b

Figura 3.5: Valor medio mensual de temperatura máxima (en °C) (a) para el mes de abril, (b) para el mes de mayo en el periodo de 1986–2009

Para describir las temperaturas máximas extremas se recurrió al cálculo del percentil 90% (Fig. 3.6a), mostrando en la parte centro-norte del dominio de estudio los valores máximos, superiores a 26°C. La región de temperatura máxima representada en la figura, al ser comparada con la mancha urbana (Fig. 3.6b), muestra una clara correspondencia, confirmando que el cambio en el uso de suelo tiene impacto en la estructura del campo de temperatura y ocurrencia de eventos extremos de temperatura máxima.



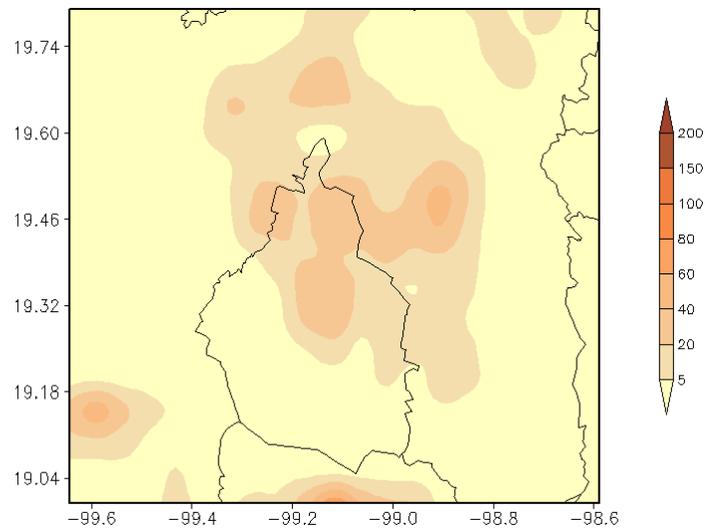
a



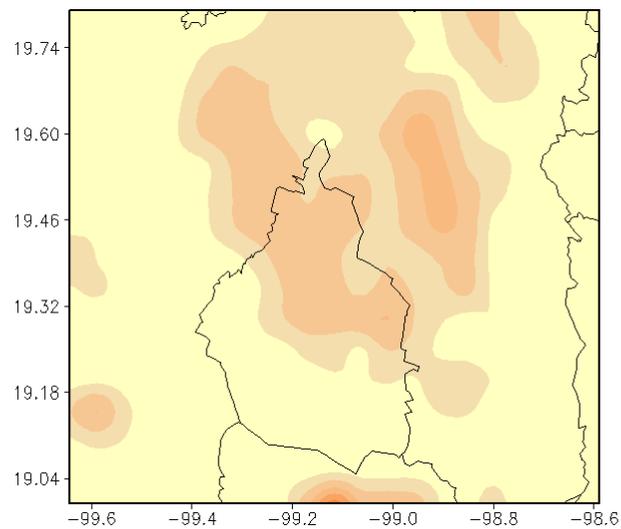
b

Figura 3.6: (a) Percentil 90 de temperatura máxima para el periodo de 1986–2009, (b) mancha urbana de 2005.

Una medida para describir la ocurrencia de eventos extremos de temperatura máxima, consiste en usar el índice de onda de calor definido como: un evento en el cual se presenta una secuencia de dos o más días en que la temperatura asciende a 30°C o más (Jáuregui 2000). Para fines del presente trabajo se decidió utilizar el número de días en lugar del número eventos como lo marca el índice originalmente. Este índice muestra el cambio en el número de días en que el Distrito Federal ha estado bajo la condición de onda de calor a lo largo del periodo de análisis. Para conocer el cambio en este índice durante los 24 años de análisis, fue necesario dividir en dos periodos, el primero de 1986–1997 (Fig. 3.7a) y el segundo de 1998–2009 (Fig. 3.7b). Se puede concluir que el número de días con temperatura igual o superior a 30°C para la parte centro del Distrito Federal se ha mantenido en un rango de 20 a 40 días por año. La diferencia en ambos periodos radica en la intensificación de días por arriba del valor máximo establecido, para regiones donde no lo era, resultando en un patrón uniforme en la parte centro-norte del Distrito Federal, extendiéndose en la zona este del Estado de México, abarcando municipios como Chimalhuacán, San Salvador Atenco y Ecatepec de Morelos, alcanzando el índice valores cercanos a 60 días bajo esta condición.



a



b

Figura 3.7: Índice de onda de calor (a) periodo 1986–1997, (b) periodo 1998–2009

3.1.2.2 Temperatura mínima

La temperatura mínima en la estación invernal presenta un valor cercano a cero grados y en algunas ocasiones temperatura bajo cero en las regiones de mayor elevación. En el caso de regiones bajas y urbanizadas la temperatura mínima se mantiene en un rango de 6° a 8°C (Fig. 3.8). Nuevamente el efecto de la urbanización se ve reflejado en la distribución del campo de temperatura mínima sobre el Distrito Federal (Jáuregui 2000). Llega incluso a hablar de “una burbuja de aire tibio” sobre la zona urbana.

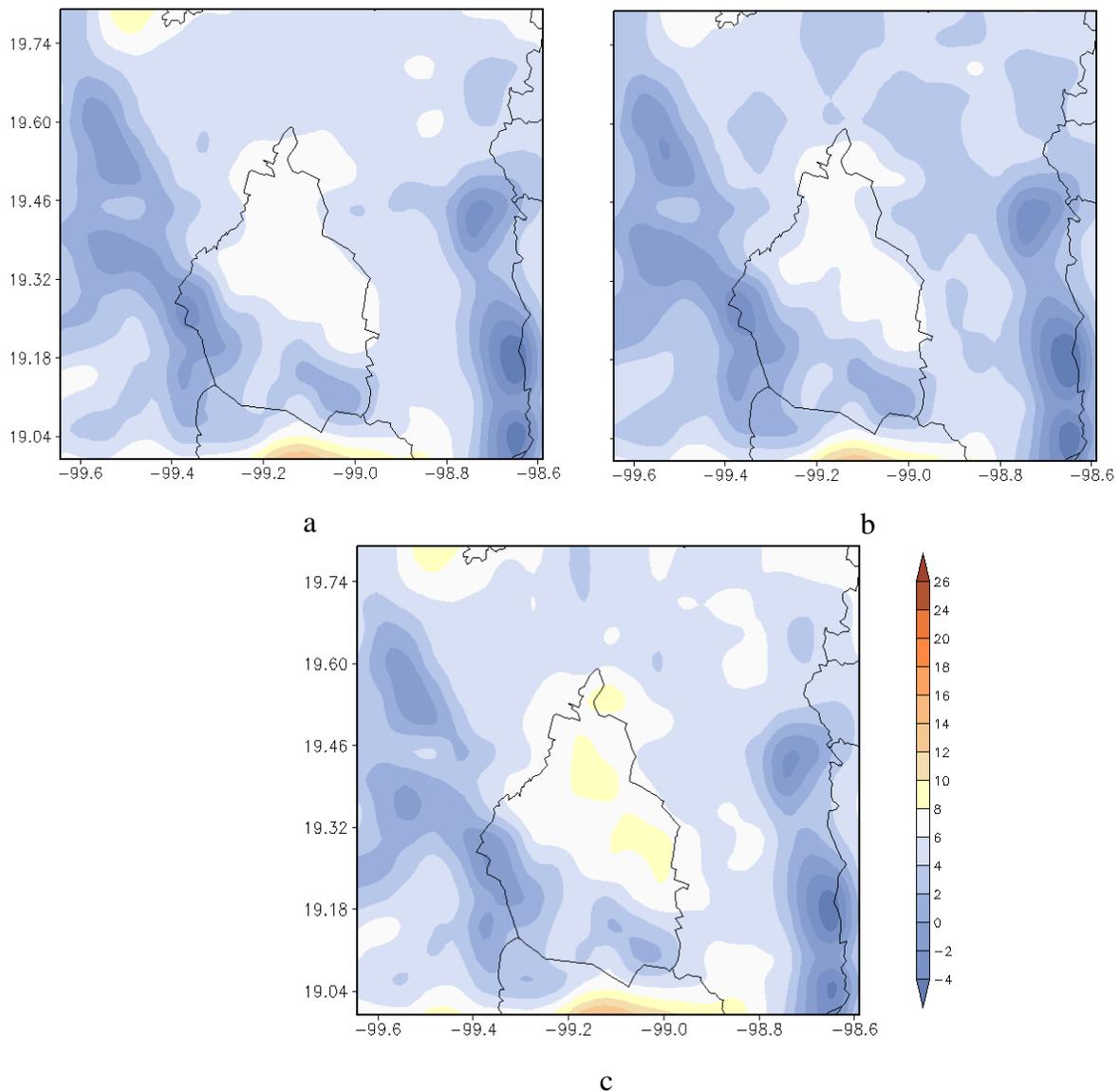
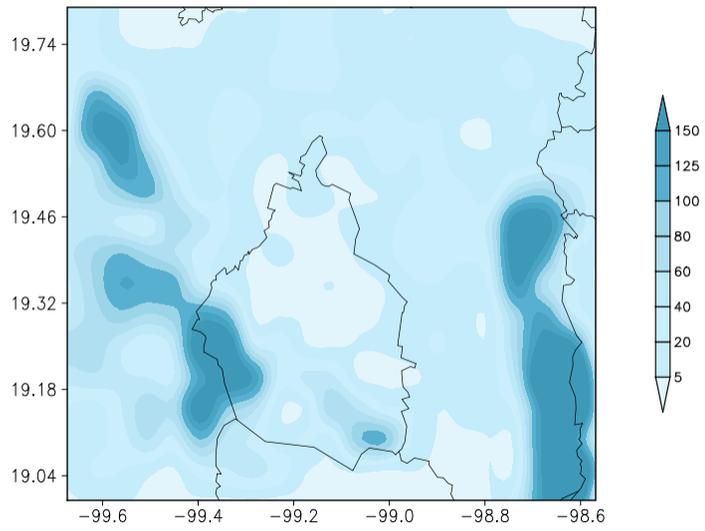
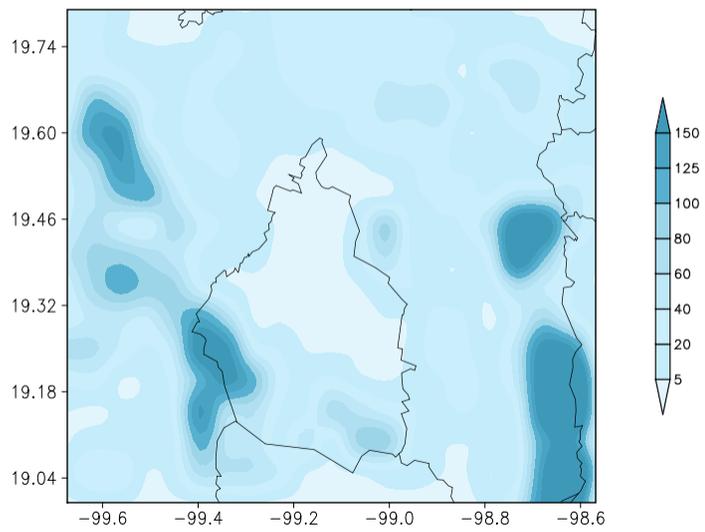


Figura 3.8: Valor medio mensual de temperatura mínima para el periodo de 1986-2009, (a) mes de diciembre, (b) enero y (c) febrero

Un análisis comparativo de la ocurrencia de ondas frías sobre el Distrito Federal permite conocer el aumento de la temperatura mínima en los últimos años. La definición de onda fría se da cuando la temperatura mínima alcanzada es menor o igual a 3°C , con una persistencia de dos o más días. El análisis se realizó de forma similar a la temperatura máxima con dos periodos de igual número de años, los resultados muestran una disminución del número de días con temperatura por debajo de 3°C en las partes altas del Distrito Federal, para la parte centro-norte se define de forma clara una ocurrencia de dos a cinco días por año (Fig. 3.9b), dando como consecuencia, que los inviernos de la última década han sido menos intensos con respecto a la década de 1980 y 1990 (Fig. 3.9a).



a



b

Figura 3.9: Índice de onda fría para el Distrito Federal, (a) periodo de 1986–1997, (b) periodo 1998–2009

3.2 Evaluación del modelo de mesoescala MM5

Como se ha explicado, los modelos de predicción numérica del tiempo permiten obtener aproximaciones de condiciones atmosféricas en el futuro cercano. Estas aproximaciones son determinadas por el conocimiento del pronosticador de los procesos físicos involucrados y la habilidad del modelo para pronosticar. No se debe perder de vista que los modelos numéricos son imperfectos pero perfectibles. Generar pronósticos de alta resolución, en este caso de 10 km, involucra procesos de mesoescala o elementos de tiempo atmosférico sensible a nivel local que actúan como forzantes determinantes del tiempo de una región.

El panorama general del clima en el Distrito Federal descrito, permitió establecer los elementos necesarios para la evaluación del Pronóstico Numérico del Tiempo de las variables de temperatura y precipitación. Contar con información de observaciones en arreglos de malla facilitó la interpretación de los resultados de estas variables.

3.2.1 Evaluación de temperatura

La temperatura pronosticada por el modelo de mesoescala, es capaz de simular condiciones de tiempo horario y diario para el Distrito Federal de acuerdo a los valores esperados. Muestra de ello es la habilidad del modelo para describir la variación de temperatura a lo largo día, conocida como variación diurna (Fig. 3.10). La temperatura en la región de análisis presenta un comportamiento casi sinusoidal durante el día y la noche, derivado del calentamiento radiativo, esto indica que encontraremos el máximo de la temperatura en un lapso de las 12–18 h y su contraparte la temperatura mínima ocurrirá de las 3 a 8 h. Los periodos mencionados en el modelo son capturados de tal forma que es posible tener confianza en la distribución de temperatura pronosticada en escala horaria.

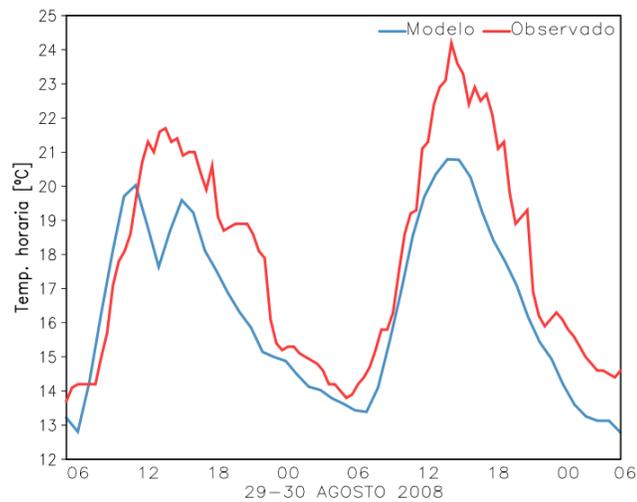


Figura 3.10: Variación de la temperatura horaria pronosticada para el 29 y 30 de agosto de 2008, en la zona centro del Distrito Federal, el eje de abscisas representa la hora local

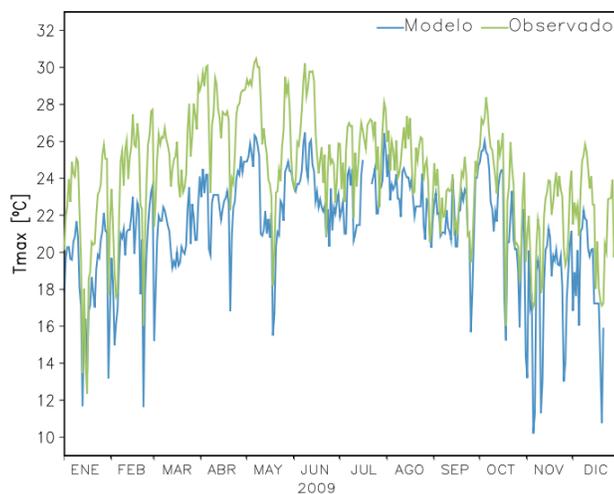
3.2.1.1 Evaluación de temperatura máxima

Hasta este punto se ha tratado solo la variación temporal de la temperatura, un elemento de igual importancia es la magnitud de la temperatura máxima y mínima pronosticada y su distribución espacial. La relevancia de conocer el desempeño del modelo en esta categoría permitirá pronosticar de manera más precisa las ondas de calor y ondas frías.

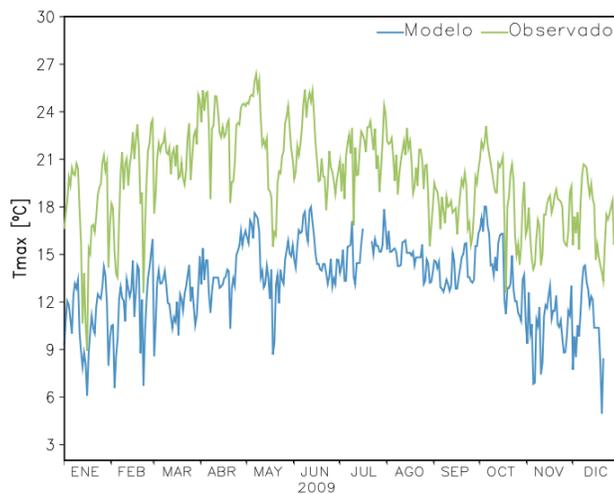
La temperatura máxima promedio pronosticada para el año 2009, al ser comparada con las observaciones en la región centro del Distrito Federal con coordenadas 19.4°N, 99.1°W y una altitud 2230 m (Fig. 3.11a); muestra una vez más la habilidad del modelo para capturar el ciclo diurno. En cuanto a la magnitud subestima de forma sistemática de 2° a 4°C, presentado las máximas diferencias para los meses de marzo a junio. La diferencia de 4°C entre la observación y pronóstico para meses que climatológicamente son los más calurosos (abril-mayo), suaviza el pico de temperatura atenuando los valores extremos que pudieran definir eventos de onda de calor.

En el análisis se consideró tomar un punto que mostrara el efecto orográfico sobre el campo de temperatura. El punto elegido fue tomado en la parte sur del Distrito Federal con coordenadas 19.18°N, 99.1°W y una altitud de 3044 m (Fig. 3.11b); en este caso la verificación arrojó un incremento en la discrepancia del pronóstico, obteniendo valores de temperatura pronosticada que subestiman a las observaciones hasta 9°C, independiente de la diferencia en magnitud, el patrón a lo largo del año es consistente en ambos casos. Este

resultado muestra la limitante de los modelos de mesoescala para resolver regiones con orografía compleja.



a



b

Figura 3.11: Comparación de temperatura máxima pronosticada y observada para el 2009, (a) serie de tiempo para la zona centro del Distrito Federal [19.4°N, 99.1°W 2230 m], (b) serie de tiempo para la zona sur del Distrito Federal [19.18°N, 99.1°W, 3044 m], muestra el efecto orográfico en el pronóstico de temperatura máxima

Un análisis complementario fue tomar tres puntos en la región centro–norte y dos puntos en el sur del Distrito Federal, para calcular la curva de distribución normal en cada uno de los puntos y con ello conocer el error en el valor medio de la temperatura máxima en el periodo 2008–2009. Los puntos ubicados en regiones bajas y de poca influencia

orográfica (Fig. 3.12), muestran en valor medio que el pronóstico subestima entre 2° y 4°C como ya se ha mencionado, teniendo mejor desempeño en la zona nor-poniente del Distrito Federal.

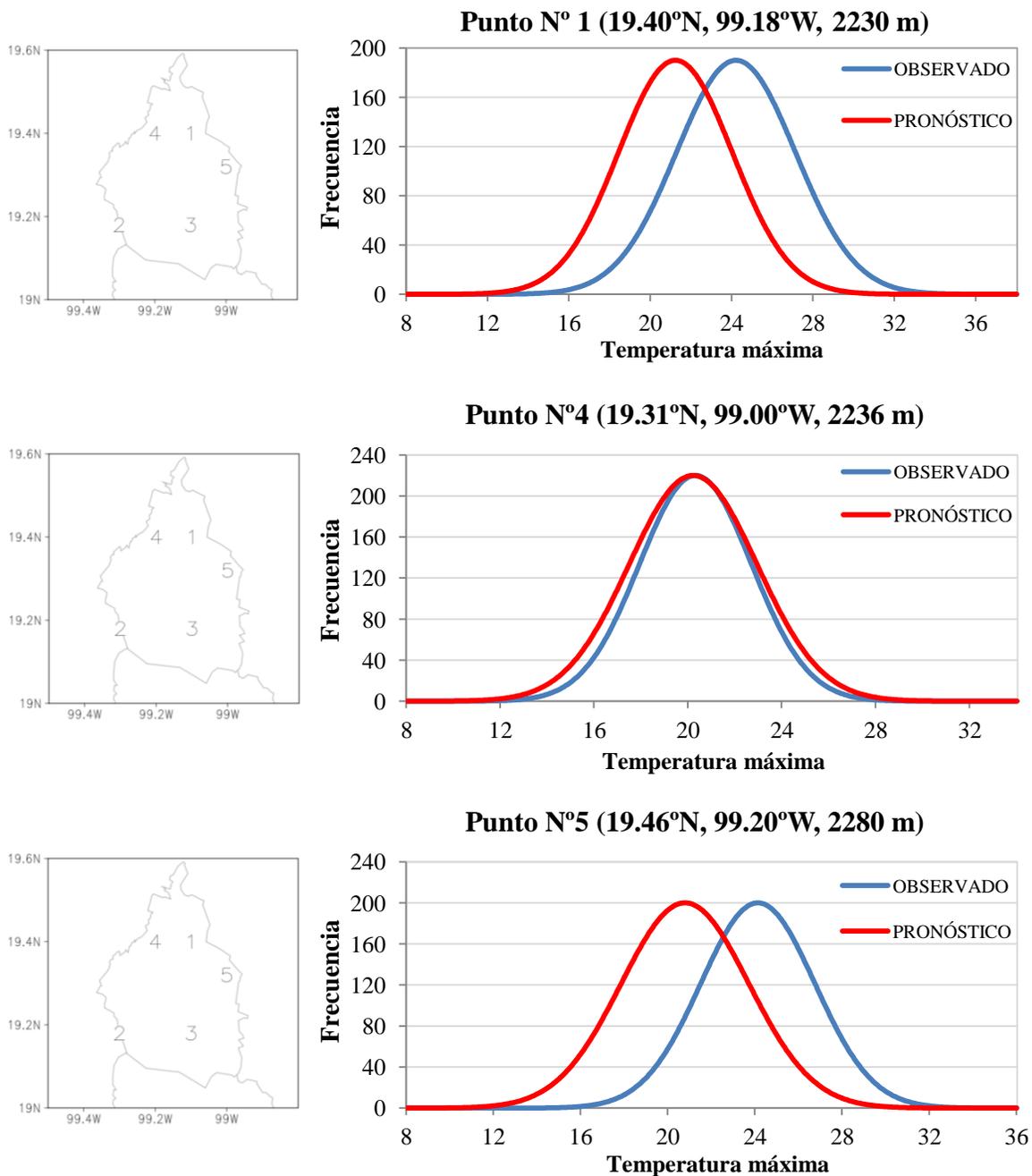


Figura 3.12: Curva de distribución normal para pronóstico de temperatura máxima y observación de puntos en zonas de menor elevación en el Distrito Federal con baja influencia orográfica

Los sitios ubicados en la zona sur reflejan el impacto del efecto orográfico en el pronóstico de temperatura, aumentando el error en el valor medio (Fig. 3.13). Aunque el efecto orográfico es uno de los forzantes de mayor impacto en el modelo, usar determinadas parametrizaciones y un uso de suelo inadecuado puede cambiar el balance radiativo y aspectos dinámicos, alterando el campo de temperatura pronosticado.

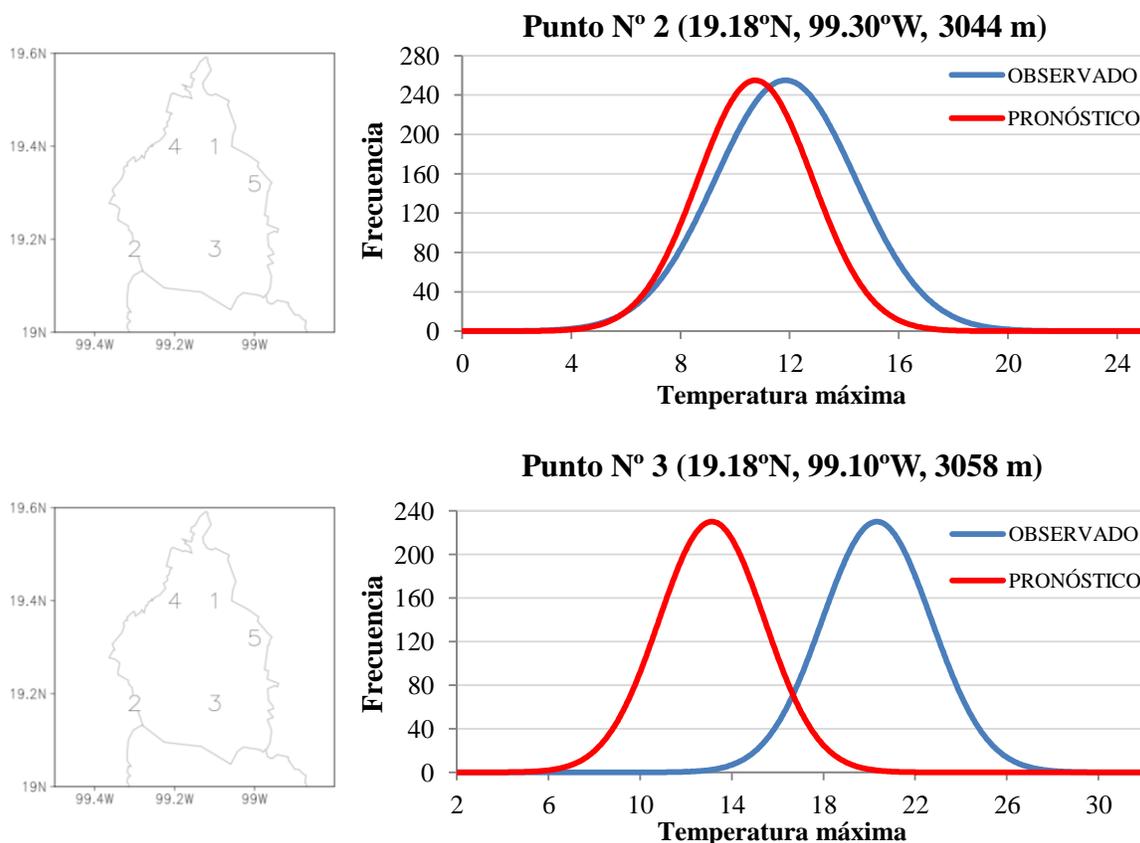
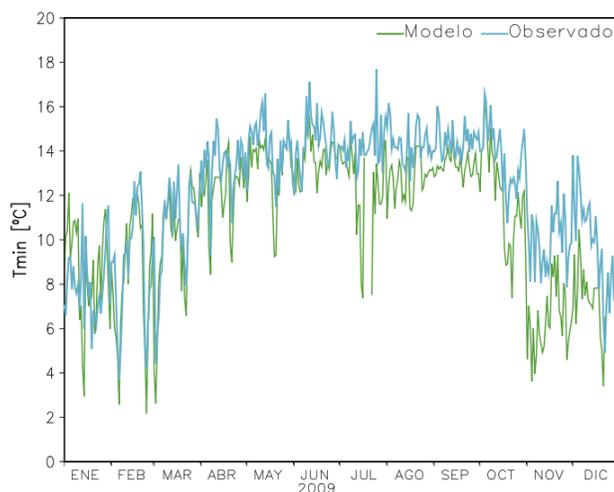


Figura 3.13: Curva de distribución normal de pronóstico y observaciones para localidades con orografía compleja

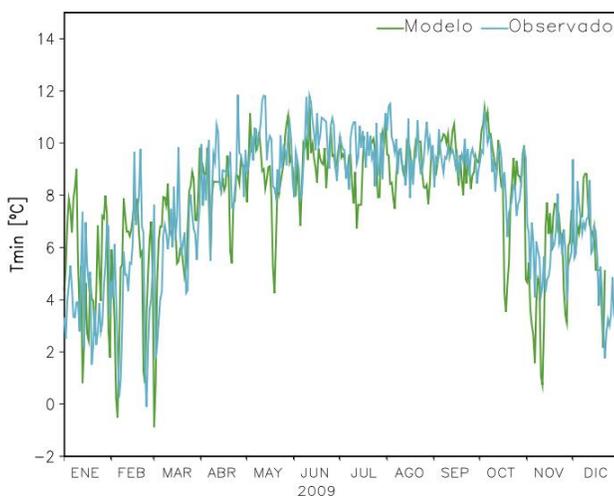
3.2.1.2 Evaluación de temperatura mínima

El desempeño del modelo al pronosticar temperatura mínima es superior respecto a la temperatura máxima en distribución temporal e intensidad. Utilizando los puntos en la zona centro y sur del Distrito Federal, se graficó la serie de tiempo de temperatura mínima de 2009 para el pronóstico y observaciones. La habilidad del modelo para simular la temperatura mínima resulta ser alta en este caso (Fig. 3.14a), tendiendo a subestimar de forma no sistemática a diferencia de la temperatura máxima) determinados eventos. El

impacto de la orografía es menos perceptible en la temperatura mínima (Fig. 3.14b), reflejado en la estabilidad del ciclo anual, encontrando valores mínimos en época invernal.



a



b

Figura 3.14: Comparación de temperatura mínima pronosticada y observada para el 2009, (a) serie de tiempo para la zona centro del Distrito Federal [19.4°N, 99.1°W], (b) serie de tiempo para la zona sur del Distrito Federal [19.18°N, 99.1°W]

En las series de tiempo (Fig. 3.14), se observa para el mes de enero una sobreestimación de 2°C y para noviembre, diciembre se invierte para la zona urbana subestimando alrededor de 4°C la temperatura, este efecto se ve reflejado en los valores medios mensuales de temperatura mínima para el pronóstico, comparado con el valor medio de las observaciones (1986–2009) se sobreestima de 2° a 4°C en la región de mayor

elevación y la zona centro del Distrito Federal la diferencia se mantiene en 2°C (Fig. 3.15), en general el pronóstico muestra temperaturas más cálidas en estos meses.

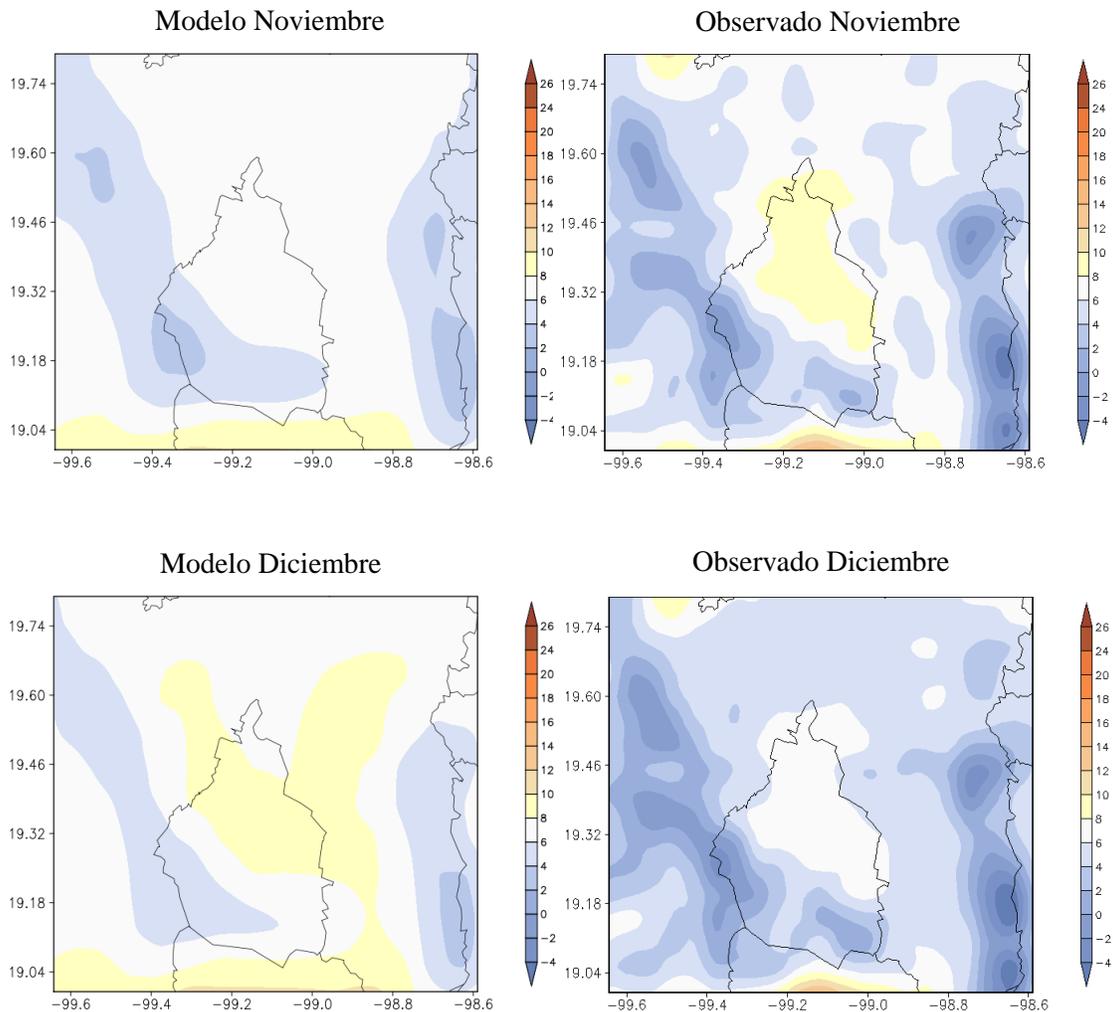


Figura 3.15: Comparación del valor medio de temperatura mínima entre pronóstico (a la izquierda) periodo 2008 – 2010 y observaciones (a la derecha) periodo 1986 – 2009, noviembre (arriba) y diciembre (abajo)

Los resultados derivados del análisis de temperatura para el modelo de mesoescala (MM5), indican una buena habilidad del modelo para simular condiciones horarias en la variable de temperatura, existiendo ciertas limitaciones, por ejemplo en la habilidad del modelo para resolver condiciones de orografía compleja y efectos debidos a la urbanización y no se debe perder de vista la influencia de la no linealidad del problema. En cuanto a los valores extremos (temperatura máxima y mínima) el modelo es sensible en forma general para capturarlos, pero si analizamos las épocas críticas, primavera para temperatura

máxima e invierno para temperatura mínima, la calidad de los pronósticos decae a consecuencia de un error que sobre y sub estima respectivamente. En principio pareciera no tener gran problema, pero pensando en orientar el pronóstico a sistemas de alerta temprana de ondas de calor o frías, y las salidas del modelo son usadas para calcular estos índices sin un post–procesamiento de corrección, la mayoría de las veces el modelo no tendrá la capacidad de resolver estos índices por la atenuación de los valores.

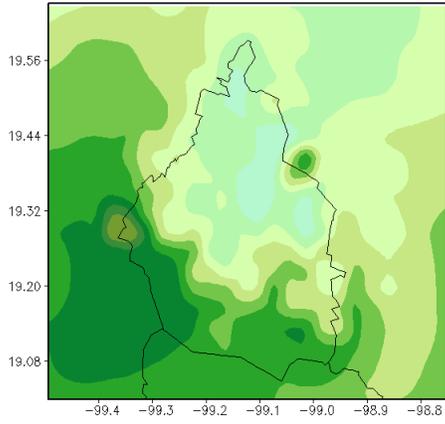
3.2.2 Evaluación de precipitación

Modelar la variable de precipitación es lo más complejo por todos los procesos de mesoescala involucrados. El caso del 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.

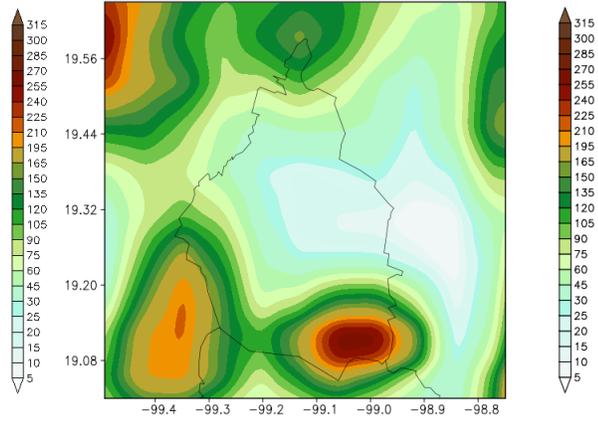
La primer parte de la evaluación consistió en elaborar un esquema de comparación visual basado en la media mensual de la observación y del pronóstico (Fig. 3.16), utilizando el promedio del acumulado mensual de las observaciones y el pronóstico para el periodo de 2003–2010 y 2008–2010 respectivamente, a los cuales nos referiremos como climatología observada y climatología del modelo.

El desempeño del pronóstico operativo con el MM5 muestra la habilidad para recrear el ciclo anual de precipitación mostrado en la climatología para la temporada de lluvia que va de mayo a octubre al cual nos referiremos como climatología de verano en adelante (Fig. 3.16), encontrando sobreestimación en magnitud de precipitación para los campos pronosticados. Una de las limitantes encontradas fue: El patrón simulado no coincide con la precipitación observada en escala mensual. Las simulaciones horarias presentan sistemáticamente un patrón en forma de “herradura” sobre la parte oriente del Distrito Federal, cuando se pronostican eventos de precipitación intensos el patrón descrito corresponde al encontrado en la climatología mensual, marcando un claro déficit de precipitación en la parte oriente del Distrito Federal alcanzando valores acumulados de 60 mm mensuales, al comparar la climatología observada y pronosticada no existe concordancia porque los valores de precipitación máxima mensual acumulada son mayores a 150 mm para los meses de lluvia más intensa. En meses de mayor actividad (agosto y septiembre) el patrón refleja la componente orográfica del modelo aunque sigue persistiendo el déficit de precipitación en la zona oriente del Distrito Federal.

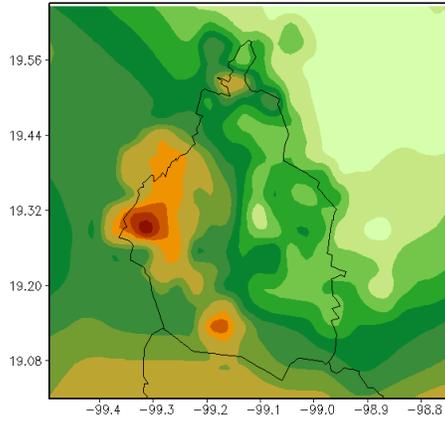
Observado Mayo



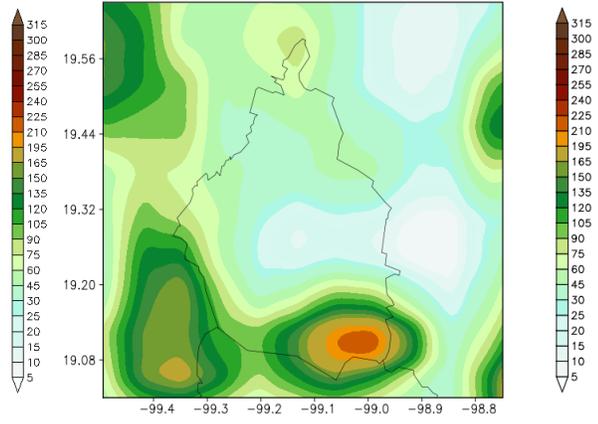
Pronosticado Mayo



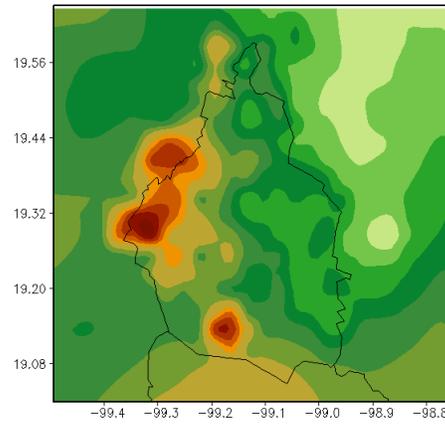
Observado Junio



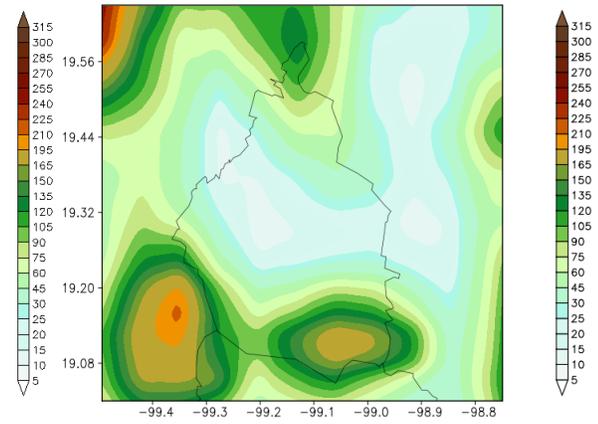
Pronosticado Junio



Observado Julio



Pronosticado Julio



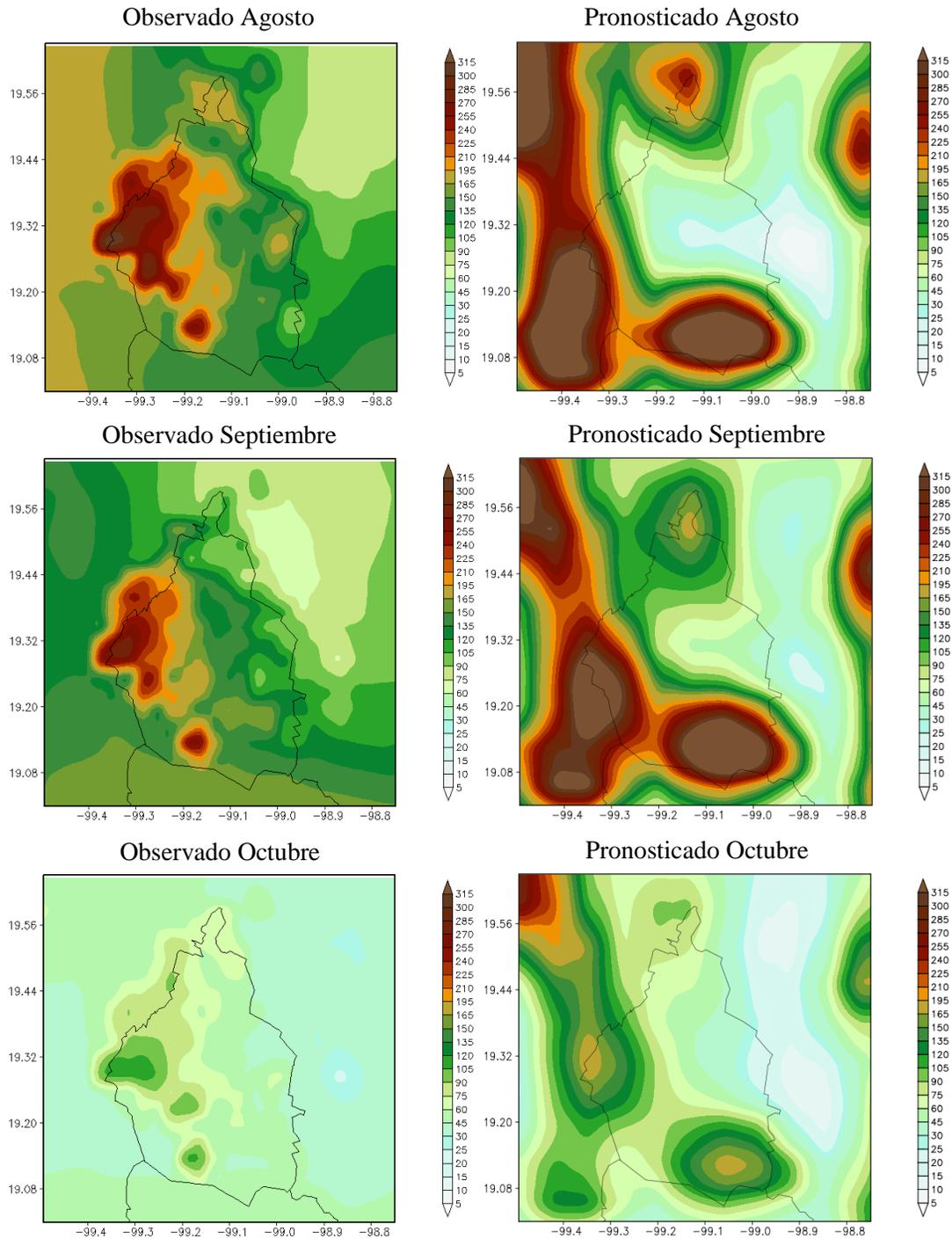


Figura 3.16: Valor medio de precipitación acumulada mensual observada (a la izquierda), valor medio de precipitación acumulada mensual del modelo (a la derecha)

Para dar una explicación sobre la diferencia entre los valores de precipitación observados y lo modelado se usó la técnica de Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs por sus siglas en inglés), para tratar de identificar los modos de variabilidad en ambos casos. Esta técnica permite determinar patrones de variables físicas que se repiten con mayor frecuencia, presentados en modos o patrones de variabilidad y coeficientes que determinan la variación temporal también llamados Componentes Principales (PCs por sus siglas en inglés), asociado a cada modo de variabilidad.

El propósito del análisis de EOFs es obtener los patrones espaciales dominantes en los campos acumulados de lluvia diaria, que permitan caracterizar los modos principales de la lluvia en el Distrito Federal. Los campos empleados fueron los meses de verano definidos anteriormente en el análisis de EOFs, para el periodo de 2008–2010. Se extrajeron los primeros cuatro modos de variabilidad para los campos observado y pronosticado, describiendo más del 50% de varianza total acumulada.

El primer modo de variabilidad (EOF1) de la observación de precipitación explica el 27.60% de varianza total (Fig. 3.17a) y su patrón está asociado a la ocurrencia de lluvias en las regiones donde la elevación topográfica es considerable, mostrando con ello la importancia de la orografía en la distribución de la precipitación sobre el Distrito Federal. En este primer modo las regiones poniente y sur del Distrito Federal presentan episodios de precipitación con mayor frecuencia en comparación a las regiones centro y oriente de la región de estudio; el patrón en el EOF1 corresponde a la región que climatológicamente llueve con mayor frecuencia e intensidad para los meses de verano en el Distrito Federal. El segundo modo de variabilidad (EOF2) explica alrededor del 9.8% (Fig. 3.17a) y su patrón está relacionado con la estructura de dipolo norte-sur, el cual puede relacionarse a un mecanismo modulador de la precipitación en dirección meridional.

Al comparar los modos de variabilidad de las observaciones con el modelo (Fig. 3.17b), se encuentran grandes diferencias en el EOF1 aunque la varianza explicativa total es del orden del 30% para ambos casos. La diferencia radica en la forma en que el modelo hace llover con mayor frecuencia, creando nuevamente la forma de “herradura” en la región centro-oriental del Distrito federal y los valores máximos de ocurrencia se ubican muy al sur, cerca del estado de Morelos. En el caso del EOF2 el modelo es capaz de capturar el modo de variabilidad asociado al dipolo norte-sur encontrado en las observaciones, aunque existe persistencia en la ocurrencia de eventos en la parte sur, dicha persistencia puede explicarse como un elemento de amplificación en la intensidad de la precipitación en esa región.

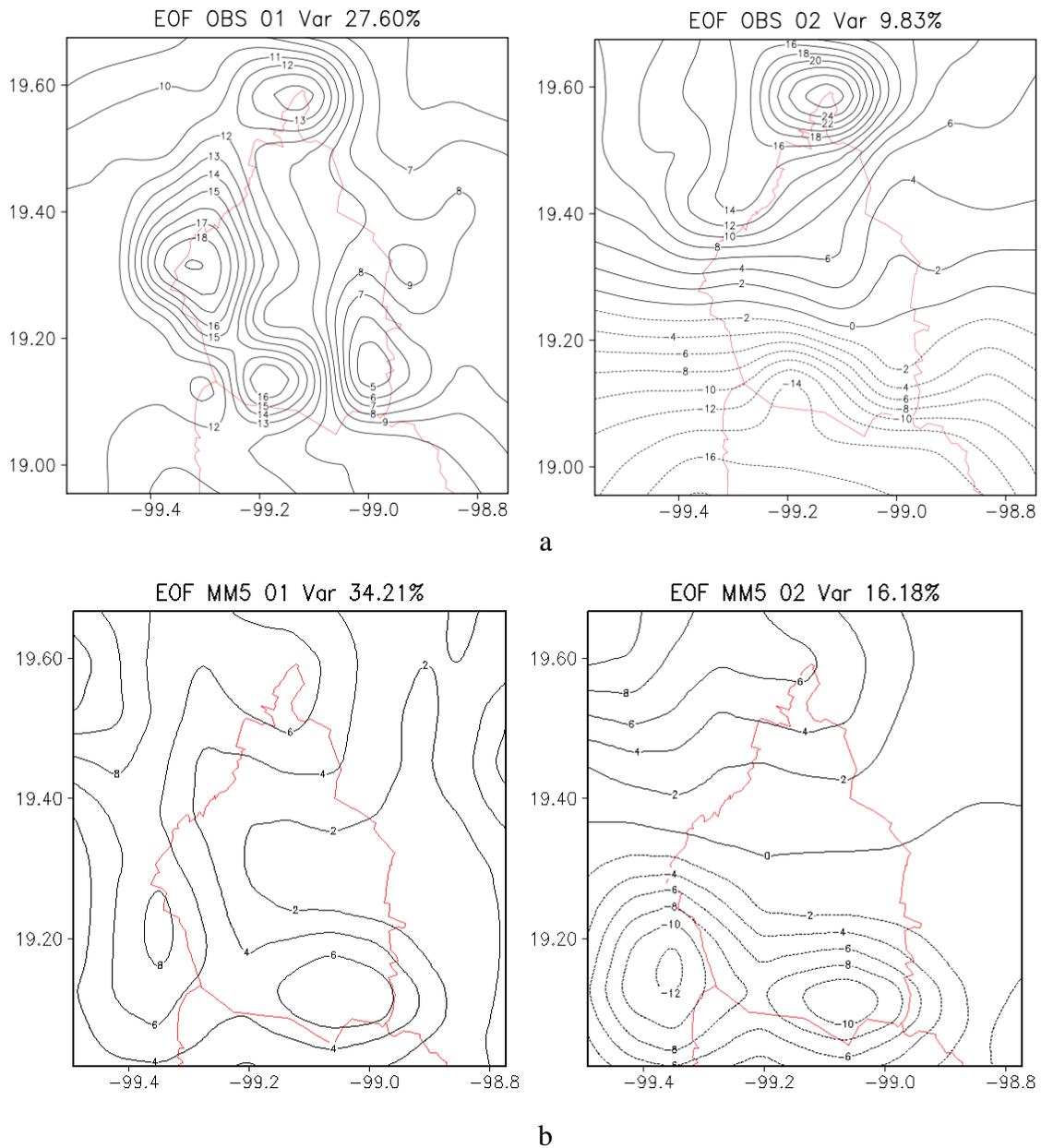


Figura 3.17: Modos de variabilidad EOFs para (a) observaciones y (b) modelo de mesoescala MM5

Los resultados de la variable precipitación muestran limitada habilidad del modelo para pronosticarla; los errores sistemáticos están presentes en magnitud al sobreestimar la precipitación acumulada diaria, posición espacial y forma del campo pronosticado. A nivel temporal, el modelo en algunas ocasiones no logra simular lluvia, cuando las observaciones indican ocurrencia de eventos y viceversa. Al no tener el modelo la sensibilidad mencionada, tratar de implementar correcciones de tipo estadístico basadas en valores horarios, diarios o medios, por ejemplo la regresión de componentes principales permitirá

corregir la posición del patrón, pero en escala temporal seguirán existiendo las variaciones que marcan la diferencia con las observaciones.

3.3 Hipótesis del error en el modelo

Los resultados del análisis de las variables temperatura y precipitación obligan a pensar las posibles fuentes de error en el modelo. De acuerdo a la literatura las principales fuentes de error en pronósticos de alta resolución se divide en dos categorías; la primera relaciona parámetros estáticos determinantes en el pronóstico de mesoescala que son la topografía y el uso de suelo. La segunda categoría se refiere a aspectos dinámicos que dan origen al tiempo atmosférico en la región y la forma en que son configurados en el modelo.

El desarrollo de este trabajo contempló verificar los parámetros estáticos del modelo MM5 en su versión operativa. El uso de suelo empleado en el modelo se define con 24 categorías de acuerdo a la nomenclatura del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), el cual ha sido modificado en trabajos previos de estudiantes del Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM, para mejorar la representación del uso de suelo en el modelo. Cada una de las categorías proporciona al modelo un conjunto de parámetros físicos (albedo, emisividad, humedad, rugosidad e inercia térmica) necesarios para resolver las ecuaciones de pronóstico. Al observar el uso de suelo del modelo se encontró no estar actualizado en la parte urbana sobre el Distrito Federal (Fig. 3.18a), además no estaban representadas las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Cuautla, Puebla y Pachuca. Una propuesta es actualizar el uso de suelo con información reciente que puede ser tomada del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (Fig. 3.18b).

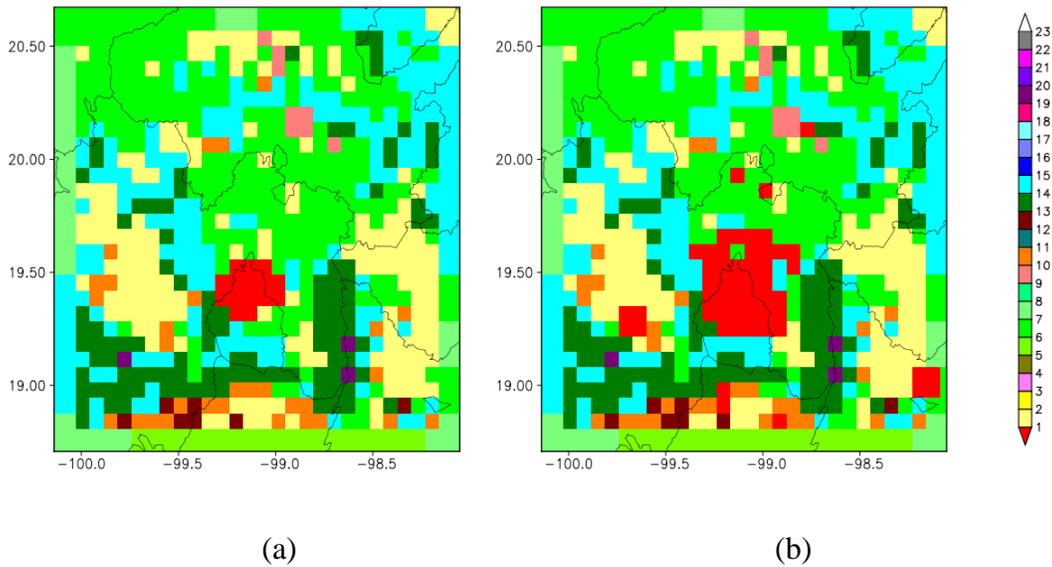


Figura 3.18: (a) Uso de suelo empleado en el modelo de forma operativa, (b) propuesta de uso de suelo modificado según información de INEGI y adaptada a la clasificación de 24 categorías de acuerdo con el USGS.

En cuanto a elevación el modelo utiliza topografía de alta resolución a 30 segundos, para crear el dominio en el módulo TERRAIN, realizando la interpolación a 10 km. La interpolación realizada tiende a suavizar los máximos orográficos, creando una versión atenuada de las elevaciones para el dominio (Fig. 3.19a). Una de las condiciones necesarias en la modelación de procesos de mesoescala es contar con un campo de elevaciones que se ajuste de la mejor manera a la orografía. La propuesta es mejorar la descripción de la componente orográfica en el modelo, ya sea cambiando la fuente de información o mejorar el esquema de interpolación en el módulo TERRAIN (Fig. 3.19b). De optar por la primera opción, la mejora en la descripción de la topografía debe hacerse para el dominio madre y el anidado, porque modificar solo la topografía del dominio anidado, puede generar problemas en su frontera al momento de interactuar con el dominio madre, esto es causado por las diferencias de altura, provocando amplificación de los valores de pronóstico para campos como el de viento.

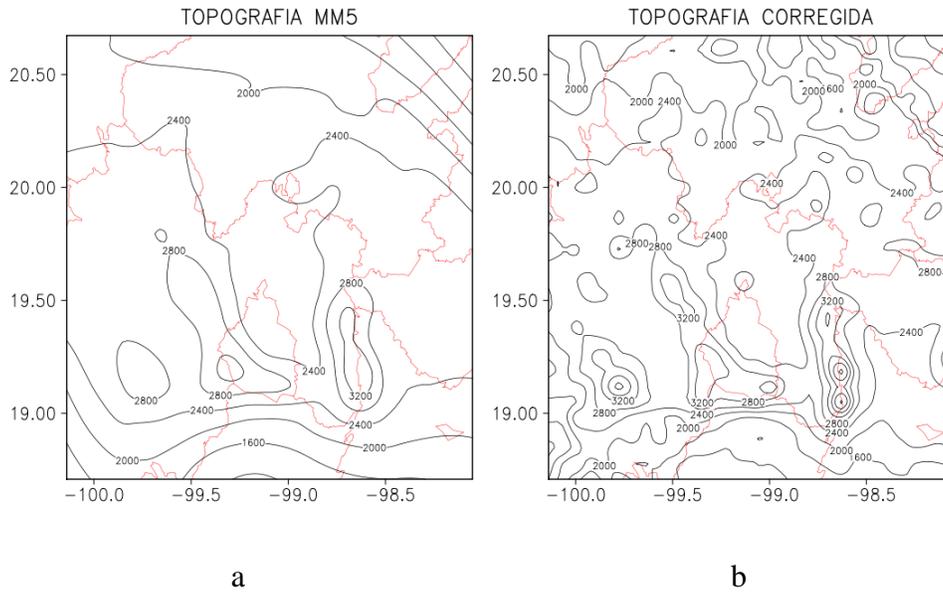


Figura 3.19: (a) Topografía interpolada a 10 km por el módulo TERRAIN, (b) propuesta de topografía a 10 km, la diferencia radica en usar información de elevaciones a alta resolución e interpolar a la resolución usada en el dominio anidado (10 km)

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 corridas deberán realizarse con el esquema original de pronóstico operativo para el modelo MM5, con la finalidad de evaluar los cambios en los campos pronosticados. En caso de obtener resultados negativos será necesario hacer un estudio de las variables dinámicas descritas en la configuración del modelo, para describir de una mejor manera los procesos físicos involucrados.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

4.1. Conclusiones

Explorar métodos de asimilación de datos permitió generar información del estado de la atmósfera. A partir de la integración de numerosas fuentes de información es posible visualizar el comportamiento de una gran cantidad de variables meteorológicas en escala regional, la importancia de contar con información de calidad a esas escalas, permite entender procesos físicos que dan origen al tiempo atmosférico. Un análisis de las variables de temperatura y precipitación para el Distrito Federal, ayuda a comprender y confirmar la ocurrencia de eventos como el incremento en el número de ondas de calor en la última década, causadas por el acelerado cambio de uso de suelo, crecimiento caótico del Distrito Federal y la relación que guarda con la disminución de las ondas frías. Por otra parte la importancia de contar con información horaria de precipitación en arreglos de malla, abre la posibilidad de investigar aspectos dinámicos de procesos que dan origen a la precipitación en el Distrito Federal, por ejemplo la génesis, desarrollo y trayectoria de las tormentas.

El conocimiento generado a partir de la comprensión de procesos físicos, ayuda a diseñar esquemas de pronóstico numérico. Estos esquemas han evolucionado por la necesidad de contar con información cada vez más detallada de regiones como el Distrito Federal, donde el tiempo atmosférico solamente puede ser descrito con meteorología de mesoescala. Tratar de modelar las condiciones de tiempo para pronósticos de alta resolución obliga a pasar de la mesoescala α a la γ y trabajar en la mesoescala γ implica describir fenómenos a escala de menos de 20 km y con duración de minutos a unas cuantas horas, como tormentas, viento intenso, etc. En este aspecto el desempeño del modelo MM5 se encontró limitado para la variable de precipitación, indicando la necesidad de realizar pruebas de sensibilidad de parámetros estáticos, dinámicos y con ello calibrar el modelo para mejorar la calidad de los pronósticos de tiempo.

La información generada por modelos numéricos de predicción del tiempo, adquiere valor después de validar el pronóstico, en primer lugar para investigación, seguida de

sectores gubernamentales encargados de planeación, prevención y toma de decisiones en diversas áreas (Servicio Meteorológico Nacional, Protección Civil, Secretaría de Salud, Secretaría de Seguridad Pública, entre otros). Contar con información de calidad en materia de tiempo atmosférico permite tomar decisiones antes de la ocurrencia de fenómenos potencialmente peligrosos para el sector social.

4.2 Trabajo futuro

La necesidad de contar con información de calidad para tiempo atmosférico y el incremento de eventos extremos de precipitación y temperatura en los últimos años, marca la necesidad de continuar trabajando en la calibración del modelo de mesoescala MM5 y explorar el desempeño de otros modelos como el WRF. Para la calibración del modelo se debe contar con una base de pronósticos lo suficientemente robusta, partiendo de una revisión integral sobre los parámetros empleados para realizar las corridas. Una vez calibrado el modelo se deberá crear un esquema de verificación de pronóstico, el cual permitirá calcular índices como ondas de calor, ondas frías, eventos de precipitación extrema, vendavales, etc., como productos dirigidos. En especial se debe poner énfasis en pronóstico cuantitativo de la precipitación (QPF, por sus siglas en inglés), por el impacto de las lluvias intensas sobre el Distrito Federal.

En cuanto a sistemas de asimilación de datos de observaciones, es necesario usar un método distinto al análisis objetivo tipo Cressman, con la finalidad de conservar los valores extremos observados por las estaciones en superficie después de la corrección. Una alternativa es usar la interpolación óptima, siendo una de las bondades de ese esquema conservar los valores máximos de la variable.

Referencias bibliográficas

CONAGUA: 2010. PROYECTO DE MODERNIZACIÓN DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO. Diagnóstico Institucional y Propuesta de Plan Estratégico 2010–2019, 67pp.

CRESSMAN, G.: 1959. An operational objective system. *Monthly Weather Review*. Vol. 87, p. 367–374.

EBERT, E. y McBride, J.: 2000. Verification of precipitation on weather systems: determination of systematic errors. Vol. 239, p. 179–202.

FREDERICK, G.: 1989. History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*. Vol. 4, p. 286–296.

GOLDING, B. Mylne, K y Clark, P.: 2004. The history and future of numerical weather prediction in the Met Office. *Royal Meteorological Society*. Vol. 59, N° 11, p. 299–306.

HARPER, K., Uccellini, L., Kalnay, E., Carey, K. y Morone, L.: 2007. 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction. *American Meteorological Society*. Vol. 88, p. 639–650.

HOLTON, J.,: 2004. An introduction to dynamic meteorology, Editorial International Geophysics Series, 4° edición, EUA.

JÁUREGUI, E.,: 2000. El Clima de la Ciudad de México, Temas selectos de Geografía de México, UNAM. 1° edición.

JOYCE, R., Janowiak, J., Arkin, P. y Xie, P.: 2004. CMOPRH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 5, p. 487–503.

KALNAY, E.: 1996. The NCEP/NCAR 40 – Years Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 77, p. 437–503.

KALNAY, E.: 2003. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 328pp.

KALNAY, E.: 2010. 5th North American Ensemble Forecast System, Workshop, México.

KIDD, C.: 2001. Satellite rainfall climatology: a review. *International Journal of Climatology*. Vol. 21, p. 1041–1066.

KRISHNAMURTI, T. y Tripoli, G.: 1975. Low – Level Flow over GATE area during Summer 1972. Vol. 103, p. 197–216.

KRISHNAMURTI, T. N.: 1996. *An Introduction to Numerical Weather Prediction Techniques*. Editorial CR Press, 2^o edición, Boca Ratón, EUA

LANDA, R., Magaña, V. y Neri, C.: 2008. Agua y clima: elementos para adaptación al cambio climático. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM/ Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, p. 120

LORENZ, E.: 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 20, p. 130–141

MAGAÑA, V. Y Neri, C.: 2007. Eventos Hidrometeorológicos Extremos en el Valle de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.

MESINGER F.: 2006. North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 87, p. 343–360.

MITRA, V., Das Gupta, M y Sing, V. et al.: 2003. Daily Rainfall for the Indian Monsoon Region from Merged Satellite and Rain Gauge Values: Large – Scale Analysis from Real – Time Data. Journal of Hydrometeorology. Vol. 4, p. 769–781.

ORLANSKI, I.: 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 56, p. 527–530

PÉREZ, J.: 2004. Tesis Maestría. Pronóstico Numérico del Tiempo para el Valle de México. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

PHILLIPS, N.: 1999. 50th Years – Numerical Weather Prediction. The Start of Numerical Weather Prediction in the United States. German Meteorological Society. p. 13–28.

SMITH, W., et al.: 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, v. 277, p. 1957–1962, 26 Sept., 1997

STULL, R.: Meteorology for scientists and engineers. Pacific Grove, 2° edición, p. 67

Recursos electrónicos

Meted: <https://www.meted.ucar.edu/>

Modelo de mesoescala (MM5): <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

Topografía con alta resolución: http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html

CMORPH: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html

NARR: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanl/>

SMN México: <http://smn.cna.gob.mx/>

GrADS: <http://www.iges.org/grads/>