



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**ANÁLISIS DEL EVENTO METEOROLÓGICO DEL 2007  
RELACIONADO CON LA INUNDACIÓN DE TABASCO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)**

**P R E S E N T A**

**JOSÉ VALENTÍN LÓPEZ MÉNDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ZAVALA HIDALGO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DEL 2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado bajo el registro 202356.

Al proyecto PAPIIT IN120408 Estudio y pronóstico de procesos de interacción océano-atmósfera en las regiones tropicales mediante modelos numéricos.

Al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por el aprendizaje, amistad y la confianza ofrecida durante la maestría.

A los académicos: Dra. Graciela Binimelis de Raga, Dr. José Agustín García Reynoso, Dr. Ernesto Caetano Neto y Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez; por los comentarios dirigidos a mejorar este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
Planteamiento del problema.....	3
Objetivos.....	5
<b>CAPÍTULO 1 ANÁLISIS SINÓPTICO Y REGIÓN DE ESTUDIO</b> .....	<b>7</b>
1.1 Análisis sinóptico: primer periodo.....	7
1.2 Análisis sinóptico: segundo periodo.....	11
1.3 Región de estudio.....	14
<b>CAPÍTULO 2 DATOS Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>19</b>
2.1 Modelo WRF.....	19
2.1.1 Descripción del núcleo ARW.....	21
2.1.2 Configuración del modelo.....	23
2.2 Bases de datos.....	25
2.2.1 Estaciones del SMN.....	25
2.2.2 Boyas del NDBC .....	29
2.2.3 Estaciones de la GASIR .....	29
2.2.4 Datos TRMM .....	29
2.2.5 Análisis finales del NCEP .....	31
2.2.6 Datos del reanálisis NCEPR2 .....	31
2.2.7 Imágenes satelitales .....	31
2.2 Metodología .....	32
2.2.1 Estadísticos.....	32

<b>CAPÍTULO 3 VALIDACIÓN DEL MODELO WRF</b>	<b>36</b>
3.1 Consideraciones generales	37
3.2 Temperatura a 2 m: Casos particulares	38
3.3 Temperatura a 2 m: Desempeño general del modelo WRF	44
3.4 Viento a 10 m: Casos particulares	48
3.5 Viento a 10 m: Desempeño general del modelo WRF	57
3.6 Consideraciones para un trabajo futuro	60
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	<b>62</b>
4.1 Definición de <i>Evento extremo</i>	63
4.2 Análisis del viento	64
4.3 Análisis de la precipitación	71
4.3.1 Registros <i>in situ</i>	72
4.3.2 Análisis del primer periodo de lluvias	74
4.3.3 Análisis del segundo periodo de lluvias	83
4.3.4 Análisis de las diferencias entre los periodos de precipitación	96
4.4 Influencia del huracán Noel	104
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

## CAPÍTULO 2

- 2.1 Lista de las estaciones meteorológicas del SMN y de las boyas del NDBC incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.-----26
- 2.2 Lista de las estaciones meteorológicas de la GASIR incluyendo la entidad, coordenadas y elevación-----30

## CAPÍTULO 3

- 3.1 Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z -----39
- 3.2 Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro-----43
- 3.3 Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z-----50
- 3.4 Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC-----56

## **CAPÍTULO 4**

- 4.1** Correlación compleja entre el vector de viento observado a 10 m de las boyas del NDBC y el estimado con el modelo WRF-----70
- 4.2** Precipitaciones acumuladas (mm) en las estaciones de la GASIR para los dos periodos de precipitación intensa y el total de ambos eventos -----74
- 4.3** Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el primer periodo de precipitaciones-----83
- 4.4** Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 28 al 31 de octubre, considerado como el segundo periodo para este análisis; y del 28 de octubre al 2 de noviembre, consideradas como el total del segundo evento de precipitación -----84
- 4.5** Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el segundo periodo de precipitaciones-----95

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

1.1	Análisis de superficie del día 21 de octubre a las 03Z -----	8
1.2	Imagen infrarroja del satélite GOES del día 21 de Octubre a las 03Z-----	9
1.3	Análisis de superficie del día 23 de octubre a las 15Z -----	10
1.4	Imagen infrarroja del satélite GOES del día 23 de Octubre a las 12Z -----	10
1.5	Análisis de superficie del día 25 de octubre a las 06Z -----	11
1.6	Análisis de superficie para los días (a) 29 de octubre a las 21Z y (b) 31 de octubre a las 03Z -----	12
1.7	Análisis de superficie del día 27 de octubre a las 06Z e imagen infrarroja del satélite GOES del día 27 de Octubre a las 06Z -----	13
1.8	Análisis de superficie del día 30 de octubre a las 21Z -----	14
1.9	Istmo de Tehuantepec -----	15
1.10	Normales climatológicas mensuales de la temperatura media (1951-1980) para las ciudades de: Xalapa, Ver., Oaxaca, Oax., Tuxtla Gutiérrez, Chis. y Villahermosa, Tab.-----	16
1.11	Normales climatológicas de la lámina mensual de precipitación acumulada (1941-1996) para los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco -----	17

## CAPÍTULO 2

2.1	Principales componentes del modelo WRF 3.0-----	21
2.2	Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0-----	22
2.3	Dominio utilizado para las simulaciones numéricas con el modelo WRF-3.0 -----	24
2.4	Ubicación geográfica de las 72 EMAS del SMN y de las tres boyas del NDBC ---	28
2.5	Ubicación geográfica de las estaciones de la GASIR-----	30

## CAPÍTULO 3

- 3.1** Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Campeche, Camp., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados y pronosticados por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura -----38
- 3.2** Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Angamacutiro, Mich., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados y pronosticados por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura -----39
- 3.3** Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Campeche, Camp.-----41
- 3.4** Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Angamacutiro, Mich.-----42
- 3.5** Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre-----45
- 3.6** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF -----47
- 3.7** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42002, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----48
- 3.8** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42001, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----49
- 3.9** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42001, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----49



<b>3.10</b>	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42002. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	53
<b>3.11</b>	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42001. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	54
<b>3.12</b>	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42055. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	55
<b>3.13</b>	Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre-----	59
<b>3.14</b>	Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF-----	60

## **CAPÍTULO 4**

<b>4.1</b>	Pronóstico a 57 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-21-10-2007-12Z)-----	65
<b>4.2</b>	Pronóstico a 24 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-22-10-2007-12Z)-----	65
<b>4.3</b>	Puntos tomados como referencia para definir un <i>norte</i> -----	67
<b>4.4</b>	Rapidez del viento a 10 m cada 6 horas de los datos del NCEPR2 en el punto 20°N, 93.75°W para el periodo 1979-2007-----	67
<b>4.5</b>	Distribución de frecuencias, como porcentaje de ocurrencia, de la rapidez del viento en los eventos de norte para el periodo 1979-2007 a partir de los datos del NCEPR2 -----	68
<b>4.6</b>	Observaciones horarias de la rapidez del viento a 10 m en las boyas del NDBC del 17 al 31 de octubre del 2007 -----	69
<b>4.7</b>	Comparación entre los vectores de viento a 10 m obtenidos con el modelo WRF en los puntos interpolados en las coordenadas de las boyas y las observaciones en las boyas del NDBC ubicadas en el Golfo de México, del 17 al 31 de octubre del 2007-----	70
<b>4.8</b>	Correlación lineal entre los datos horarios de la rapidez del viento observado a 10 m en las boyas del NDBC y los obtenidos con el modelo del 17 al 31 de octubre -----	71

<b>4.9</b>	Precipitaciones diarias acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre del 2007-----	73
<b>4.10</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-23-10-2007-12Z. (b) WRF-22-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas-----	75
<b>4.11</b>	Presión reducida al nivel del mar y vorticidad absoluta en 1000 hPa. FNL-23-10-2007-12Z-----	76
<b>4.12</b>	Imagen satelital infrarroja del 23-10-2007-12Z -----	76
<b>4.13</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. a) FNL-24-10-2007-12Z b) WRF: 22-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	77
<b>4.14</b>	Cortes zonales de humedad relativa en 17.43 °N (latitud de Sayula, Chiapas). a) FNL-22-10-2007-12Z; b) WRF-22-10-2007-12Z, condiciones iniciales; c) FNL-24-10-2007-00Z; d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 36 horas -----	78
<b>4.15</b>	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 22-10-2007-12Z. b) TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z-----	80
<b>4.16</b>	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 22-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z -----	81
<b>4.17</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-26-10-2007-12Z. (b) WRF-25-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	85
<b>4.18</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	87
<b>4.19</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-30-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	88
<b>4.20</b>	Humedad relativa y viento en 400 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	89
<b>4.21</b>	Cortes zonales de humedad relativa en 17.22 °N (latitud de Ocoatepec, Chiapas). a) FNL-28-10-2007-12Z. b) WRF 23-10-2007-12Z, condiciones iniciales. c) FNL-24-10-2007-00Z. d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	91
<b>4.22</b>	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir de 28-10-2007-12Z. b) TRMM del 28-10-2007-12Z al 31-10-2007-12Z-----	92

<b>4.23</b>	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir de 28-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z-----	94
<b>4.24</b>	Latitudes utilizadas para realizar los cortes zonales -----	96
<b>4.25</b>	Cortes zonales para las latitudes mostradas en la figura 4.24. a) Pronóstico a 24 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24 horas del día 28 de octubre-----	97
<b>4.26</b>	Cortes zonales igual que en 4.25. En (a), (b) y (c) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 horas respectivamente, iniciando el modelo el día 22 de octubre. En (d), (e) y (f) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 respectivamente, iniciando el modelo el día 28 de octubre-----	99
<b>4.27</b>	Cortes zonales como en 4.25. a) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 28 de octubre-----	101
<b>4.28</b>	Flujo de vapor de agua para los dos eventos de precipitación durante 72 horas de pronóstico. a) Flujo horario. b) Flujo acumulado-----	102
<b>4.29</b>	Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre-----	103
<b>4.30</b>	Imágenes satelitales del día 28 de octubre a las 12Z. a) Imagen infrarroja indicando la temperatura del tope de las nubes de acuerdo con la escala de la figura 1.2. b) Imagen de vapor de agua-----	104
<b>4.31</b>	Análisis de superficie del día 28 de octubre a las 12Z -----	105
<b>4.32</b>	Humedad relativa y viento en 850 hPa. WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 72 horas -----	106
<b>4.33</b>	Cortes meridionales para las longitudes mostradas en la figura 4.32. Pronóstico a 72 horas del 28 de octubre-----	106



# RESUMEN

A finales de octubre y principios de noviembre del 2007, las condiciones meteorológicas asociadas a un frente frío ocasionaron daños en una plataforma petrolera ubicada en el sur del Golfo de México e inundaciones en el sureste de la República Mexicana. Los daños económicos provocados por este evento fueron evaluados en 31.8 mil millones de pesos y son considerados entre los más costosos en la República Mexicana. Con el objetivo de estudiar estas condiciones meteorológicas, se utilizó el modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting Model*, configurado como un sistema de pronóstico operativo para la República Mexicana. Se analizaron también los reanálisis del *National Climatic Environmental Prediction* (NCEP), las estimaciones de precipitación del *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), datos de boyas océano-meteorológicas y de estaciones meteorológicas. Los resultados indican que el modelo reproduce con bastante precisión los sistemas meteorológicos que ocasionaron los vientos intensos sobre el Golfo de México y las precipitaciones intensas en los estados de Chiapas y Tabasco que afectaron, principalmente, a la ciudad de Villahermosa. El análisis del viento muestra que el evento de norte asociado al frente frío fue un *evento extremo*, ya que se encuentra dentro del 1.5 % del total de los *nortes* considerando el periodo 1979-2007. En cuanto a las precipitaciones, los resultados muestran que estas fueron consecuencia de diversos factores; en primera instancia, por causa del frente frío número 4 que el 23 de octubre interaccionó con un área de inestabilidad ubicada en el sureste del Golfo de México; posteriormente, entre el 28 y el 31 de octubre, como consecuencia de intensos vientos a lo largo de un frente estacionario que transportó humedad desde Florida hasta el Istmo de Tehuantepec, principalmente a través de los niveles bajos de la atmósfera. Se encontró que no hubo un aporte de humedad de la tormenta tropical Noel que se ubicaba al suroeste de Florida y que las precipitaciones fueron consecuencia de la combinación de condiciones meteorológicas y no del cambio climático antropogénico. La evaluación de los datos de precipitación indica que el satélite TRMM subestimó la precipitación registrada hasta en un 50%, mientras que con las simulaciones numéricas se obtuvieron mejores resultados. El análisis del desempeño de las simulaciones numéricas mostró que en condiciones de viento débil el modelo tiene errores considerables en la dirección del viento, pero reproduce con bastante precisión los cambios drásticos en la dirección y magnitud asociados al evento extremo. Para la temperatura, se encontró que el modelo es capaz de reproducir gran parte de la variabilidad del ciclo diurno de temperatura, así como la variabilidad de este parámetro debida a cambios drásticos en las condiciones atmosféricas.

# ABSTRACT

During late October and early November 2007, weather conditions associated with a cold front caused damages and casualties in an oil platform located in the southern Gulf of Mexico and severe floods in southeastern Mexico. The economic lost due to this meteorological event was estimated in 31.8 thousand million pesos (~2.5 thousand million USD) and the event is considered among the more costly natural disasters in Mexico. In order to study the meteorological conditions of this event, the *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) is used, configured as an operational forecast system. In addition, data from the *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) reanalysis, the *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) precipitation estimations, buoys, and weather stations are analyzed. Results indicate that the model reproduces quite accurately the mesoscale systems linked to the strong winds over the Gulf of Mexico and the intense precipitation in Chiapas and Tabasco states that affected mainly the city of Villahermosa, which is located in Tabasco. The wind analysis shows that the norther event associated with the cold front can be considered as an extreme weather event, since it is among the 1.5% of the northers considering the period 1979-2007. Results show that precipitation was a consequence of several factors; first, by the interaction between cold front number 4 and an instability area located in the southern Gulf of Mexico on October 23; later, between October 28th and 31st, as a result of a low level jet along a stationary front that carried moisture from the Florida Peninsula to the Isthmus of Tehuantepec. Furthermore, results show that there was no moisture contribution from the tropical storm Noel which was located southwest of Florida, and that the rainfall can not attributed to the anthropogenic climate change. Evaluation of precipitation data indicates that the TRMM underestimated the *in situ* measured precipitation by 50%, while numerical simulations results were better. Numerical simulations indicate that, in weak wind conditions, the model has large errors in the forecasted wind direction, but reproduce quite accurately the drastic changes in direction and magnitude associated with the extreme weather event. Regarding the surface temperature, it was found that the model reproduces much of the variability of the diurnal cycle, as well as the variability due to extreme weather changes.

# INTRODUCCIÓN

## **Planteamiento del problema**

Por su ubicación geográfica, la República Mexicana es afectada por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno y por sistemas tropicales en verano. De octubre a abril un gran número de sistemas de alta presión provenientes de altas latitudes llegan a la República Mexicana; estos sistemas son conocidos comúnmente como *nortes* y se caracterizan por tener asociadas masas de aire frío y seco, provocando que las temperaturas mínimas del ciclo anual se registren en los meses de invierno y que las láminas de precipitación acumulada en el sureste del país sean las menores con respecto al ciclo anual de precipitación. De junio a noviembre predominan los sistemas tropicales asociados con masas de aire cálido y húmedo, por lo que se alcanzan los máximos en las láminas de precipitación para la mayor parte del país. Son varios los sistemas que afectan a la República Mexicana durante el verano; entre los más importantes están el monzón mexicano y los ciclones tropicales, tanto del Océano Pacífico como del Océano Atlántico. Los sistemas meteorológicos, tanto de invierno como verano, tienen influencia directa sobre la sociedad y los distintos sectores económicos del país. Por ejemplo, las bajas temperaturas que se registran cuando predominan los sistemas invernales llegan a causar decesos y pérdidas en el sector agrícola debido a que los cultivos no resisten las temperaturas extremas; en el verano, las constantes lluvias causan el crecimiento y desbordamiento de ríos que conllevan inundaciones y afectan a miles de personas.

Es claro entonces que México es vulnerable a una diversidad de patrones atmosféricos en cualquier época del año, y que puede verse afectado por un número grande de fenómenos meteorológicos en una determinada temporada del año (por ejemplo, varios ciclones tropicales), o bien por algunos

casos particulares que generen condiciones meteorológicas extremas. Esta situación hace evidente la necesidad de estudiar estos fenómenos, con el propósito de conjuntar información que ayude a prevenir o mitigar desastres futuros.

En este trabajo se estudia un evento particular, a saber, el frente frío número 4 ocurrido a finales de octubre del 2007, el cual se caracterizó por tener asociados vientos y precipitaciones intensas que contribuyeron al accidente en una de las plataformas petroleras ubicadas en el sur del Golfo de México y a la inundación en el estado de Tabasco, afectando principalmente la ciudad de Villahermosa, que es la capital del estado.

El estado de Tabasco está localizado en el sureste de la República Mexicana, tiene una extensión de 24,738 Km<sup>2</sup> y representa el 1.3 % del territorio nacional (INEGI, 2008). Sus límites políticos están distribuidos de la siguiente manera: el norte del estado está limitado por el Golfo de México y Campeche; al sur está limitado por la frontera con el estado de Chiapas; al este limita con Campeche y la República de Guatemala, y al oeste con el estado de Veracruz. La superficie del estado está compuesta principalmente por una planicie con una altitud menor a 50 metros sobre el nivel del mar (msnm), pero en el sur empiezan las pendientes orográficas de las regiones montañosas que se extienden hacia el estado de Chiapas. La ubicación geográfica del estado, su baja altitud y su proximidad con el Golfo de México, determinan el desarrollo de climas cálidos con influencia marina, donde la variabilidad de temperatura es moderada. Tiene un ciclo estacional de precipitación con lluvias más intensas de junio a octubre, y es una de las seis regiones más lluviosas, ya que junto con Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Campeche y la Sierra de Chihuahua contribuyen al 40% del volumen de precipitación anual total en México.

De acuerdo con el análisis de impacto socioeconómico realizado por la CEPAL (2008), la inundación cubrió con agua el 62% de la superficie del estado y dejó casi 1.5 millones de damnificados (75 % de la población de Tabasco). El daño económico fue evaluado en 31.8 miles de millones de pesos considerando todos los sectores, actividades y estratos sociales afectados, y es catalogado como uno de los desastres más grandes ocurridos en México, sólo superado por el impacto de los sismos en la Ciudad de México en 1985 y los efectos acumulados de los huracanes Wilma y Stan ocurridos en el 2005.



El estudio del evento meteorológico llevado a cabo en este trabajo se realiza fundamentalmente utilizando el modelo numérico atmosférico de mesoescala llamado *Weather Research and Foracasting Model* (WRF). El WRF es el resultado de la interacción entre diversas instituciones que se han planteado como objetivo construir un modelo de pronóstico numérico para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock, 2008). Es denominado modelo de *siguiente generación* debido a las capacidades que se han agregado a lo largo de su desarrollo y que han mejorado, en muchos casos, la reproducción de procesos atmosféricos con respecto a modelos similares como el MM5 (*Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model*). En México existen varias instituciones que han implementado operativamente modelos para realizar predicción numérica del tiempo; sin embargo, la mayoría ha trabajado con el modelo MM5, el cuál ha dejado de ser desarrollado por el surgimiento del modelo WRF (UCAR, 2008b). Aunque es grande el número de investigaciones realizadas con el modelo MM5 en México, no existen trabajos acerca de una evaluación de los sistemas de pronóstico implementados y menos de estudios análogos con el modelo WRF. Por esta razón, en este trabajo se utiliza el modelo WRF como herramienta principal el cuál, a la par del desarrollo de este trabajo, ha sido implementado operativamente en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Además de analizar los detalles del evento meteorológico en particular, se estudian los alcances y limitaciones del modelo mediante un proceso de evaluación estadística, comúnmente denominado *validación*. Para lograrlo, se utilizan bases de datos que complementan la información meteorológica y que sirven para evaluar los resultados numéricos. Dichas bases de datos incluyen mediciones *in situ*, datos satelitales, salidas de otros modelos, etc.

## **Objetivos**

Los objetivos planteados para el desarrollo del trabajo de tesis son los siguientes:

- Caracterizar los aspectos meteorológicos particulares del frente frío número 4 que afectó a la República Mexicana a finales de octubre y principios de noviembre del 2007, utilizando el modelo atmosférico WRF y diversas fuentes de datos.
- Evaluar la habilidad del modelo WRF para la reproducción del evento.

- Determinar con qué frecuencia pueden suceder eventos similares.
- Evaluar los productos satelitales de estimación de precipitación durante el evento.
- Evaluar el desempeño del modelo como un sistema de pronóstico aplicado a la República Mexicana.

La tesis consta de cinco capítulos. El capítulo uno incluye la descripción sinóptica del caso de estudio, es decir, una descripción de las condiciones meteorológicas que ocasionaron los vientos en el Golfo de México y las precipitaciones en el sureste de la República. En el capítulo dos se describe el modelo WRF y la configuración utilizada para realizar las simulaciones numéricas; asimismo se describen las bases de datos y los estadísticos usados para el proceso de validación. En el capítulo tres se presentan los resultados del proceso de validación; en primera instancia se analizan los pronósticos para algunos casos particulares en un tiempo determinado y posteriormente se extiende el análisis para la República Mexicana durante el periodo de tiempo que va del 1 de octubre al 5 de noviembre. En el capítulo cuatro se presentan y discuten los resultados referentes a las condiciones meteorológicas del evento con base en las simulaciones numéricas, analizando detalladamente la magnitud de los vientos y de las precipitaciones. Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones del trabajo.

# CAPÍTULO 1

## ANÁLISIS SINÓPTICO

### Y REGIÓN DE ESTUDIO

Las condiciones meteorológicas que se analizan en este trabajo ocurrieron entre el 23 de octubre y el 2 de noviembre del 2007. De acuerdo con la información meteorológica recopilada, el análisis del evento puede realizarse considerando dos periodos de tiempo. El primero involucra las condiciones meteorológicas del 23 al 25 de octubre, periodo que se caracterizó por la entrada de un sistema de alta presión a la República Mexicana que provocó vientos intensos y fuerte oleaje sobre el Golfo de México, así como precipitaciones en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche. El segundo período puede considerarse entre el 28 de octubre y 2 de noviembre, el cual se caracterizó por intensas precipitaciones sobre el sureste de México que contribuyeron a uno de los desastres más grandes registrados en México, la inundación de la ciudad de Villahermosa en Tabasco. Considerando los daños reportados durante estos dos periodos de tiempo, la región de estudio se centra en el Golfo de México y en la región sureste de la República Mexicana, particularmente los estados de Chiapas y Tabasco.

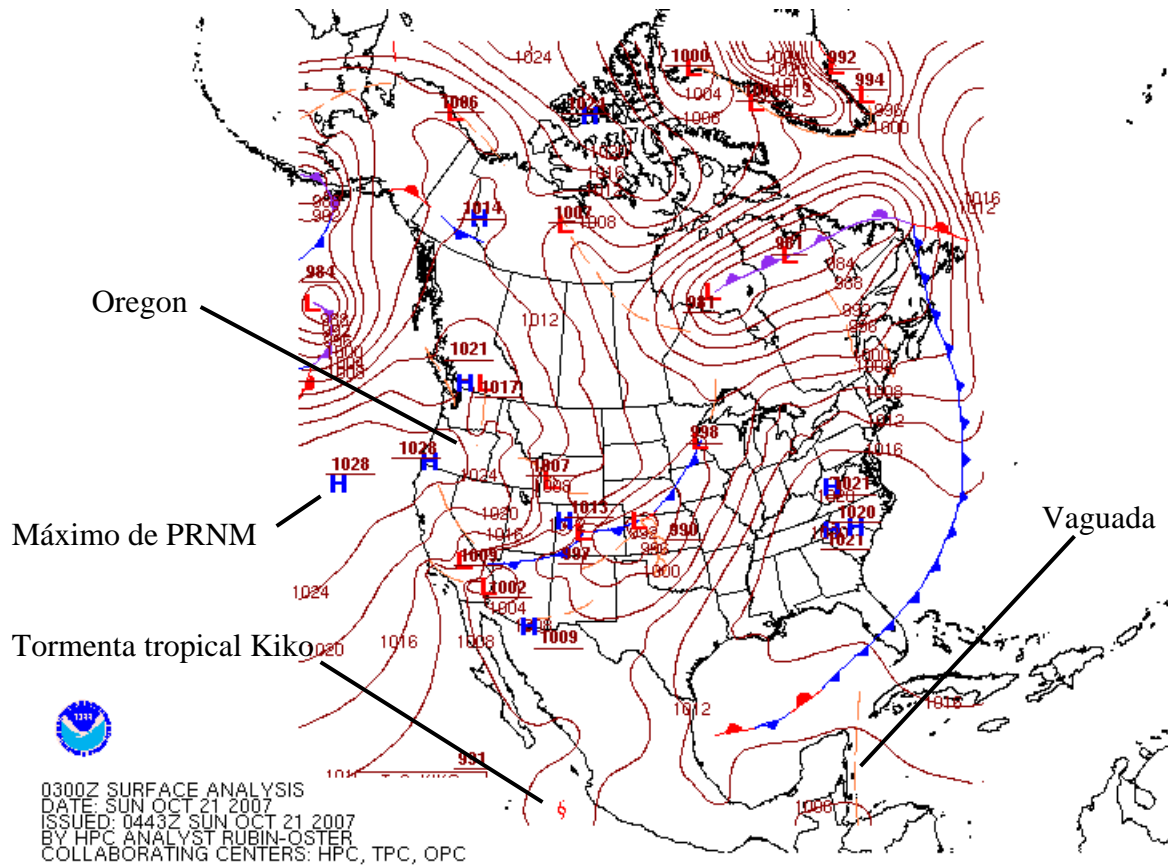
#### **1.1 Análisis sinóptico: primer periodo**

De acuerdo con el análisis de superficie del *Hydrometeorological Prediction Center* (HPC, 2008), el 21 de octubre a las 03Z (Fig. 1.1) un sistema de alta presión entró a Estados Unidos (E.U.) por los estados de Oregon y Washington, cuyo centro presentaba un valor máximo de presión reducida al nivel del mar (PRNM) de 1028 hPa. Al mismo tiempo, en el Golfo de México se ubicaba un frente estacionario que se extendía desde el estado de Florida en E. U. hasta Tamaulipas en México y en el Mar Caribe se identificaba una zona de inestabilidad asociada a una vaguada<sup>1</sup>. En el Océano

---

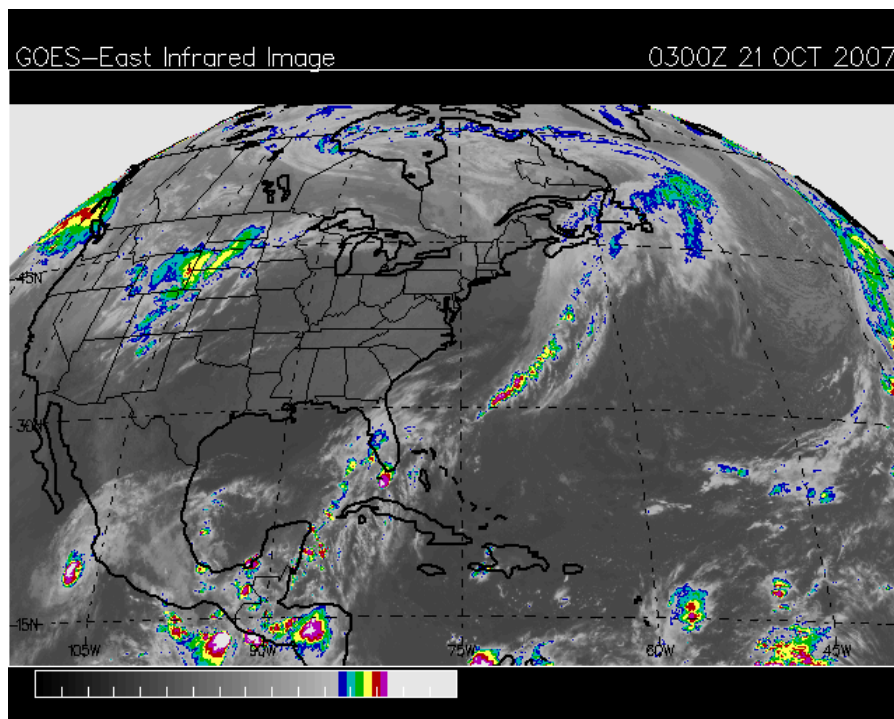
<sup>1</sup> El término vaguada se refiere a un área alargada de relativa baja presión atmosférica.

Pacífico se aprecia la tormenta tropical Kiko que, de acuerdo con el *National Hurricane Center* (NHC) se ubicaba a más de 150 millas náuticas de Manzanillo, Colima, con un desplazamiento y continua debilitación en dirección oeste-noreste (NHC, 2008).



**Figura 1.1.** Análisis de superficie del día 21 de octubre a las 03Z. La figura denota con H (Azul) los centros de alta presión y con L (Roja) los centros de baja presión. Las líneas azules con triángulos indican los frentes fríos, las rojas con medios círculos los frentes cálidos, la combinación de las dos líneas anteriores los frentes estacionarios y las líneas moradas representan los frentes ocluidos. Las líneas de vaguada se denotan por líneas discontinuas de color naranja. Fuente: HPC.

La imagen infrarroja del satélite GOES correspondiente a la misma fecha del análisis (Fig. 1.2) muestra un área de fuerte convección sobre el Golfo de Tehuantepec, el área de inestabilidad asociada a la vaguada en el Mar Caribe y una débil convección en el Océano Pacífico asociada con los efectos de la tormenta tropical Kiko.



**Figura 1.2.** Imagen infrarroja del satélite GOES del día 21 de Octubre a las 03Z. La barra de color indica la temperatura del tope de las nubes, el color más oscuro representa temperaturas mayores, los colores y el brillo intenso indican las temperaturas más bajas. Estas últimas pueden ser asociadas con áreas de fuerte convección y tormentas. Fuente: *California Regional Weather Service (CRWS, 2008)*.

El movimiento de los sistemas meteorológicos fue tal que en 24 horas el sistema de alta presión intensificó su presión al pasar por Las Rocallosas, alcanzando un valor de PRNM de 1043 hPa. Posteriormente, el sistema se desplazó hacia el sureste y la masa de aire frío asociada se extendió sobre un área que abarcaba el oeste de E.U., el norte de México y el Golfo de México (Fig. 1.3), imponiendo condiciones de subsidencia en la atmósfera, descenso de temperaturas en superficie y convección a lo largo de la línea frontal.

El paso del sistema de alta presión a través del Golfo de México provocó vientos intensos y fuerte oleaje que afectaron las zonas costeras mexicanas. La humedad asociada a la vaguada en el Caribe se desplazó hacia el oeste e interactuó con la convección que generaba el frente frío al atravesar el Golfo de México, ocasionando lluvias intensas en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas entre los días 22 y 25 de octubre (Fig. 1.4).

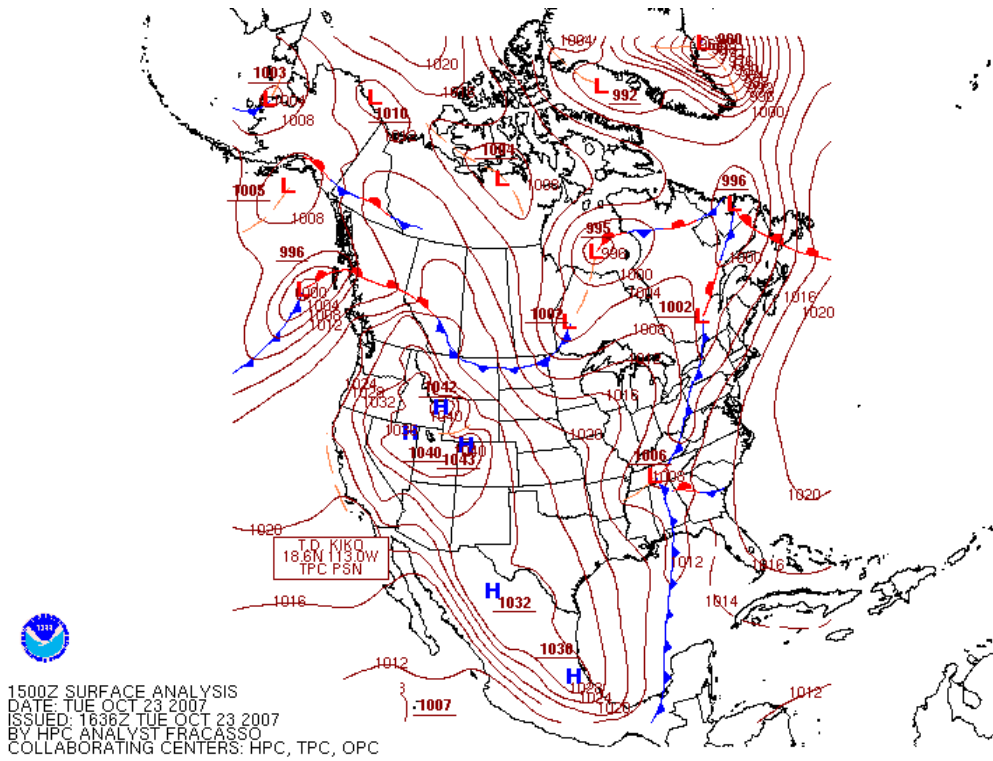


Figura 1.3. Similar a la figura 1.1 pero para el día 23 de octubre a las 15Z.

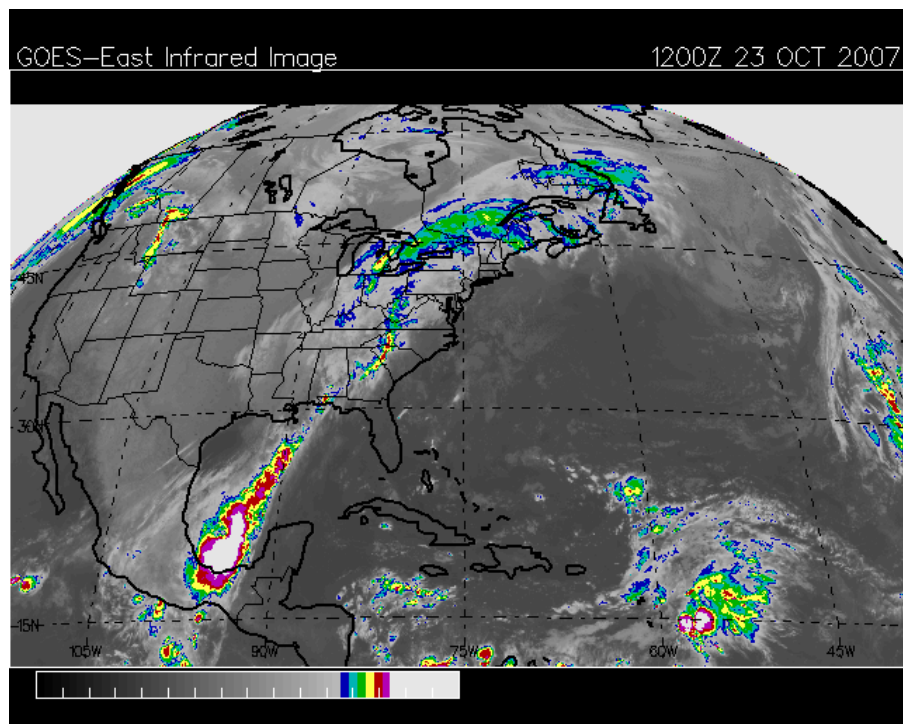
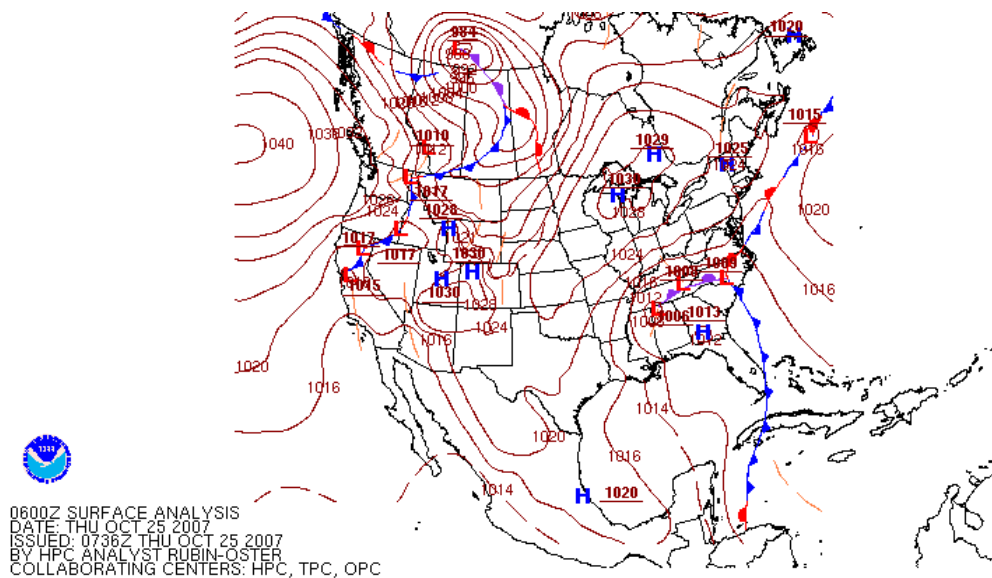


Figura 1.4. Similar a la figura 1.2 pero para el día 23 de Octubre a las 12Z.

El reporte especial emitido por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) acerca del frente frío, menciona que los fuertes vientos sobre el Golfo provocados por el sistema de alta presión fueron pronosticados desde el día 18 de octubre (SMN, 2007). El pronóstico del día 22 de octubre del SMN, 24 horas antes de que el frente frío cruzara el Golfo, indicó que la intensidad de los vientos sería de *fuerte* a *severa*. De acuerdo con la escala que manejan en los pronósticos de viento, el término *fuerte* significa vientos entre 62 y 88 Km/hr y *severo* significa vientos mayores a 118 Km/h; ambos términos están relacionados con la escala Beaufort, la cual hace referencia a vientos sostenidos. El reporte no contiene información especial acerca de los pronósticos de precipitación a pesar de que ahí mismo se indica que del 19 al 25 de octubre se registraron precipitaciones acumuladas de hasta 396 mm en Sayula, Chiapas.

## 1.2 Análisis sinóptico: segundo periodo

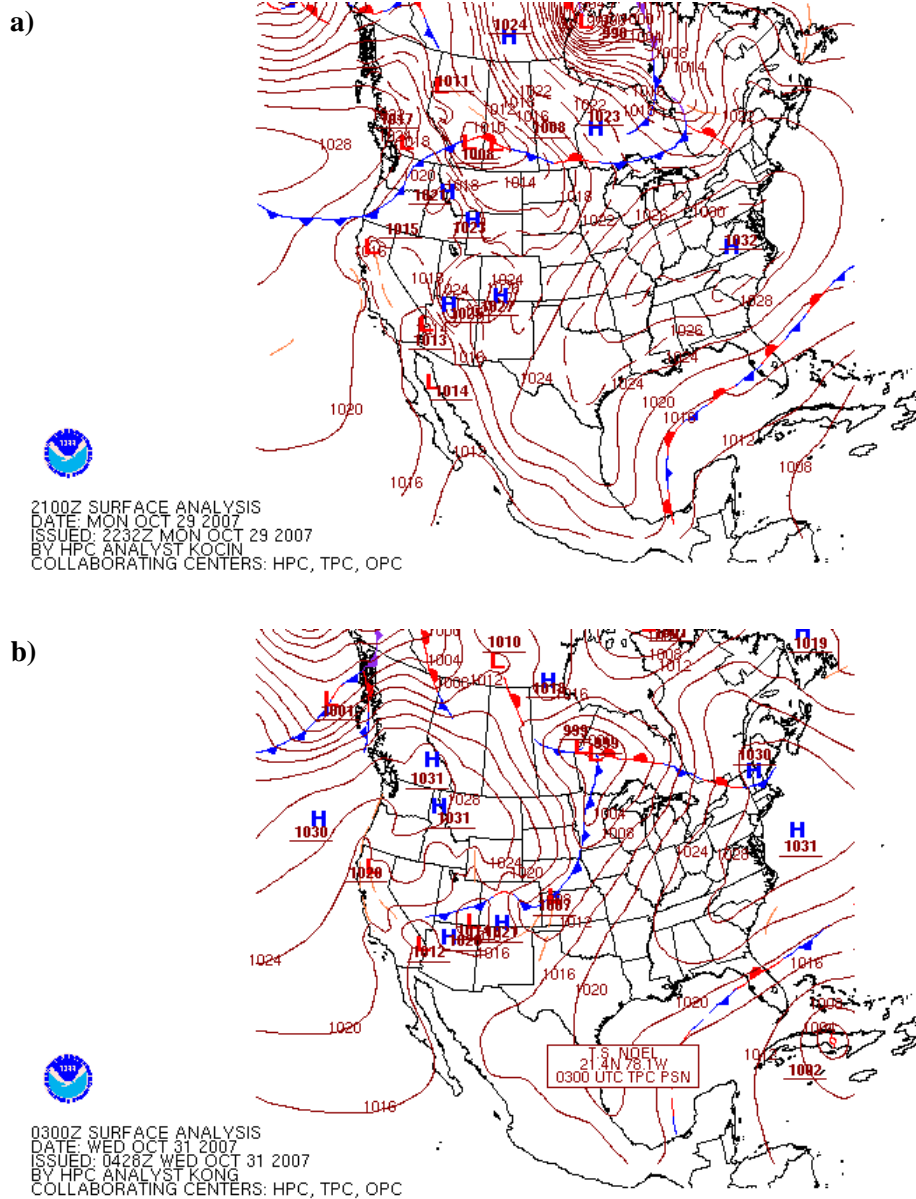
El análisis de superficie del día 25 de octubre (Fig. 1.5) muestra que el frente frío se modificó a frente estacionario debido a la interacción con una gran masa de aire tropical ubicada en el Mar Caribe. Posteriormente, el frente se desplazó hacia el oeste como un frente cálido hasta llegar al Istmo de Tehuantepec, donde se convirtió en estacionario debido a que un nuevo sistema de alta presión llegó al Golfo de México, provocando una nueva intensificación de los vientos con una componente predominante del norte, dirigidos a la costa sur del Golfo de México.



**Figura 1.5.** Similar a la figura 1.1 pero para el día 25 de octubre a las 06Z.



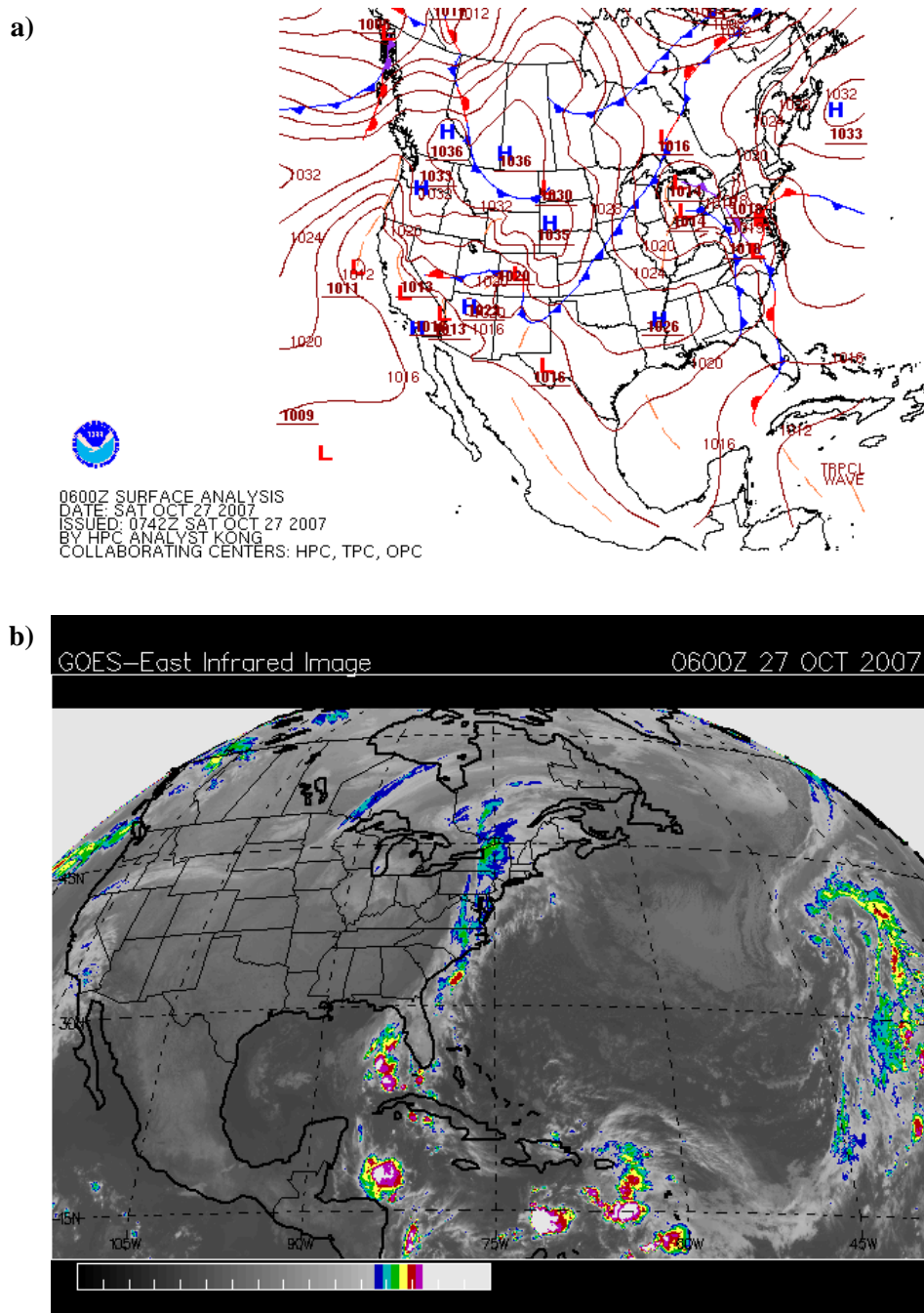
El día 29 el frente estacionario se extendía desde Florida hasta las costas de Tabasco (Fig. 1.6a) manteniéndose en esa posición por más de 48 horas (Fig. 1.6b), generando un flujo de vientos hacia el Istmo que transportó humedad y contribuyó a las precipitaciones registradas en esa región.



**Figura 1.6.** Similar a la figura 1.1 pero para los días (a) 29 de octubre a las 21Z y (b) 31 de octubre a las 03Z.



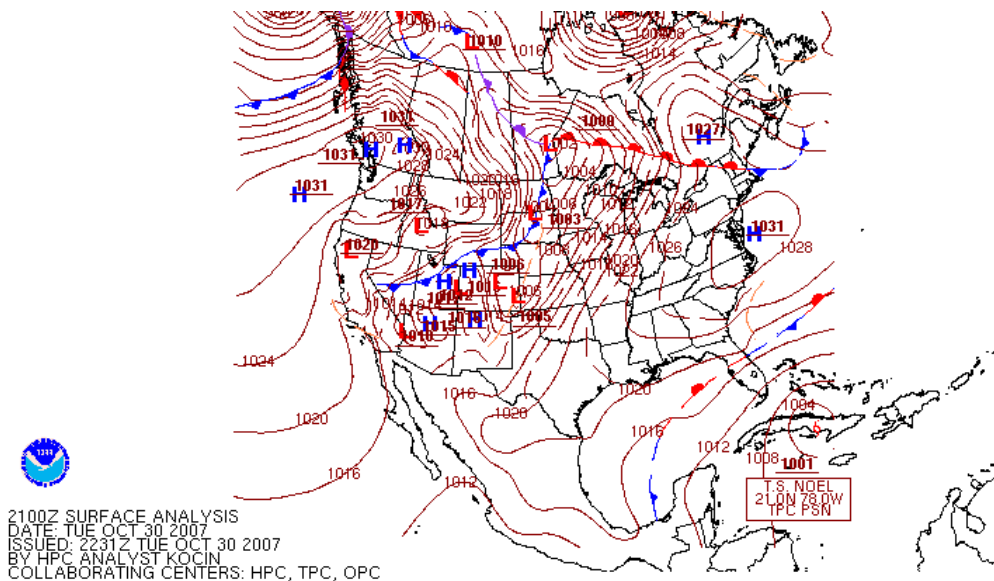
Mientras el frente se desplazaba al oeste en el Mar Caribe un área de convección asociada a una línea de vaguada y una onda tropical se desplazaba hacia la Península de Yucatán (Fig. 1.7a y 1.7b). La humedad asociada a estas condiciones fue advectada hacia el Istmo al encontrar el flujo de vientos ya establecido sobre el Golfo de México.



**Figura 1.7.** (a) Análisis de superficie del día 27 de octubre a las 06Z. (b) Imagen infrarroja del satélite GOES del día 27 de Octubre a las 06Z.

Los pronósticos del SMN del 28 al 31 de octubre indicaron precipitaciones *intensas*, categoría máxima en su escala para los pronósticos de precipitación, lo cual significa que las lluvias acumuladas en 24 horas podrían ser mayores a 70 mm. Los registros superaron ampliamente la precipitación que estimaban los pronósticos, ya que el informe indica que la precipitación acumulada entre del 26 al 31 de octubre en Ocoatepec, Chiapas alcanzó 962 mm.

Por otra parte, la figura 1.8 muestra sobre Cuba el centro de baja presión asociado a la tormenta tropical Noel. El desarrollo de este sistema ocurrió cuando aún se encontraba el frente estacionario y el flujo dirigido hacia el Istmo, por lo que se analizó la posibilidad de que este sistema hubiera aportado humedad a través de este flujo de vientos, contribuyendo a las precipitaciones del segundo periodo (ver sección 4.4).



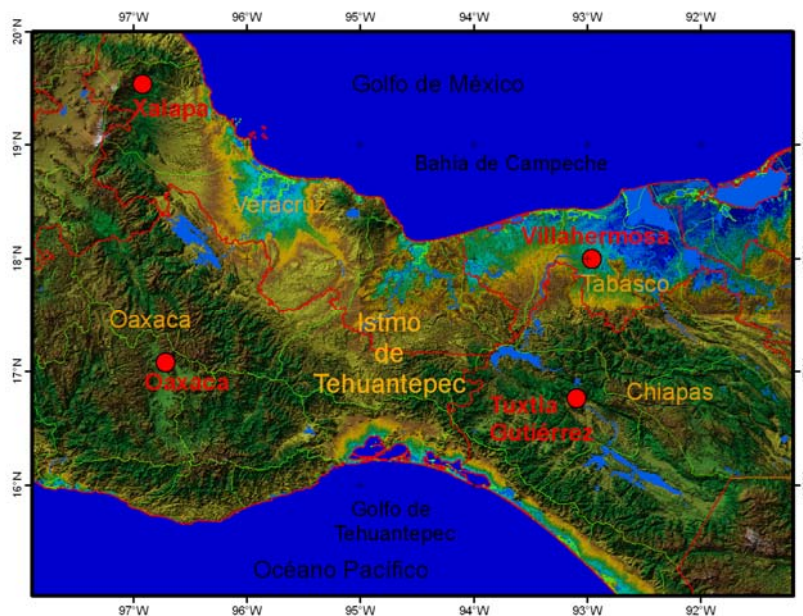
**Figura 1.8.** Análisis de superficie del día 30 de octubre a las 21Z.

### 1.3 Región de estudio

La región de estudio de este trabajo se determinó en base a las zonas que fueron afectadas con las condiciones meteorológicas descritas en las secciones anteriores. En el primer periodo los fuertes vientos que se registraron en el Golfo de México contribuyeron al accidente de la plataforma petrolera Usumacinta ubicada en el sur del Golfo de México. El accidente ocasionó 22 pérdidas humanas, daños económicos y un impacto al medio ambiente como resultado del derrame de

combustible (Senado de la República, 2008). En cuanto al segundo periodo la descripción sinóptica indica que las precipitaciones contribuyeron a la ocurrencia de la inundación de la ciudad de Villahermosa en Tabasco. Por lo anterior y de acuerdo con lo descrito en la introducción, el área geográfica de interés para este estudio es el sur del Golfo de México y el sureste de México, particularmente los estados de Chiapas y Tabasco.

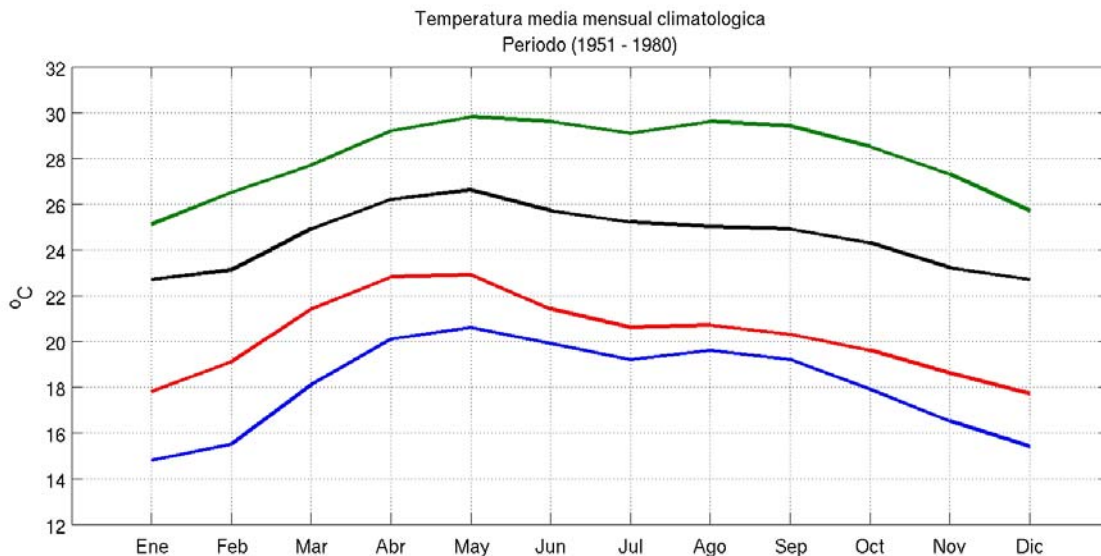
El estado de Tabasco tiene una extensión territorial de 24,738 Km<sup>2</sup> y representa el 1.3% de la superficie del país mientras que Chiapas cuenta con una extensión de 73,289 Km<sup>2</sup> y representa el 3.7% del territorio (INEGI, 2008). Parte de los estados de Tabasco, Chiapas, Oaxaca y Veracruz conforman la región del Istmo de Tehuantepec, que es una delgada extensión territorial que separa al Golfo de México del Océano Pacífico (Fig. 1.9). Esta región se ubica en medio de varias cadenas montañosas, al oeste se localiza la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Oaxaca mientras que al este se encuentra la Sierra Madre de Chiapas, con una altitud superior a los 2,000 msnm. El Istmo representa un cambio drástico en la topografía pues su altitud es de aproximadamente 250 msnm, con una extensión longitudinal aproximada de 40 Km. Enfocándose sobre los estados de Tabasco y Chiapas, se observa que la altitud de la Sierra de Chiapas disminuye hacia los límites con el estado de Tabasco, en donde el terreno se convierte en una planicie con alturas por debajo de los 50 msnm, lo cual convierte a la región en un área vulnerable a inundaciones.



**Figura 1.9.** Istmo de Tehuantepec.

La climatología del Istmo está determinada por los sistemas meteorológicos de gran escala de invierno y verano, y aunque los sistemas de alta presión no son los únicos factores que regulan la climatología de la región, si tienen influencia en la variabilidad anual de la temperatura y de la precipitación.

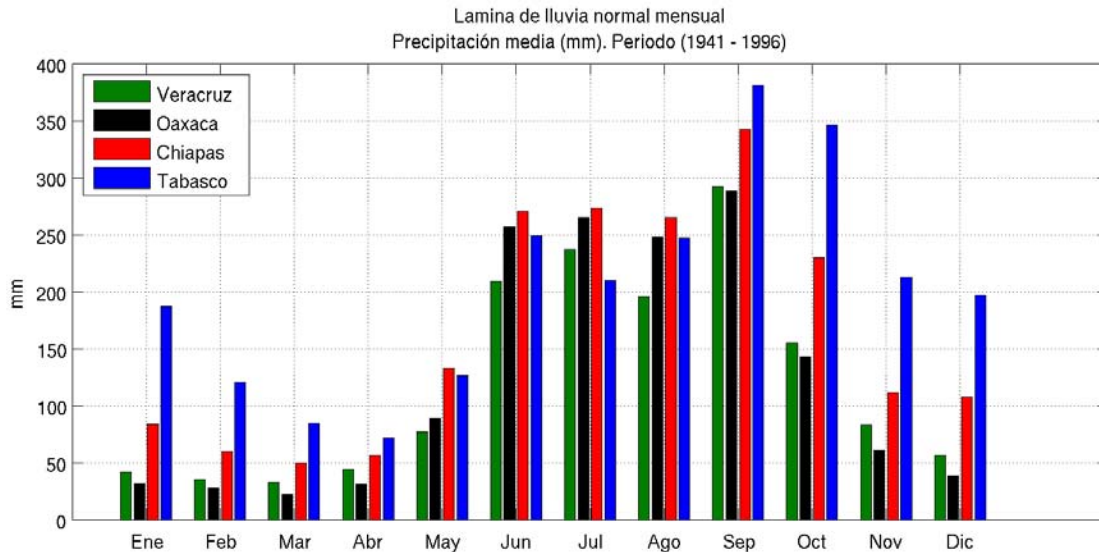
De octubre a abril la región está influenciada por el paso constante de los sistemas de alta presión provenientes de E.U., los cuales causan un descenso en la temperatura media a partir de los meses de septiembre y octubre debido a que están asociados con masas de aire frío (Fig. 1.10). Para el mes de marzo la temperatura media empieza a ascender, justo cuando el número de sistemas fríos de latitudes medias que entran a la región disminuye y las condiciones meteorológicas predominantes son de sistemas de latitudes tropicales.



**Figura 1.10.** Normales climatológicas mensuales de la temperatura media (1951-1980) para las ciudades de: Xalapa, Ver. (azul), Oaxaca, Oax. (rojo), Tuxtla Gutiérrez, Chis. (negro) y Villahermosa, Tab. (verde).

La influencia de las condiciones meteorológicas asociadas con los sistemas de alta presión también es clara en la precipitación pues la lámina mensual acumulada en el sureste del país muestra una tendencia a disminuir en los meses de invierno (Fig. 1.11). Posteriormente, los promedios mensuales aumentan a partir de mayo por la influencia de sistemas como ondas tropicales o huracanes. Estas condiciones predominan hasta octubre, cuando empieza a incrementar el número de sistemas de alta presión que llegan a la región. En la figura 1.11 se aprecia también que los promedios mensuales de

precipitación acumulada más grandes para el mes de octubre, corresponden a los estados de Tabasco y Chiapas, con un valor de 346 mm y 230 mm, respectivamente. Dichos promedios son también los más grandes en todo el país.



**Figura 1.11.** Normales climatológicas de la lámina mensual de precipitación acumulada (1941-1996) para los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco. Fuente: SMN

Aunque está bien definida la influencia de las condiciones meteorológicas que predominan en la zona durante invierno y verano, es importante notar que en el mes de octubre existe la influencia de ambos patrones, por lo que podría considerarse como un intervalo de transición entre la influencia de los sistemas tropicales y los de latitudes medias. La formación del huracán Noel y la ocurrencia del frente frío número 4 en octubre del 2007, mostrados en el análisis sinóptico de la sección anterior, son un claro ejemplo de esta situación.

De acuerdo con las normales climatológicas del SMN para el periodo 1971-2000, la precipitación mensual acumulada en la ciudad de Villahermosa para el mes de octubre es de 324 mm; la máxima mensual para ese mes es de 943 mm, registrada en 1980; y la máxima diaria es de 340 mm, registrada el 30 de octubre del mismo año. Para el caso de Ocoatepec, Chiapas, el promedio de precipitación mensual es de 577 mm; la máxima mensual para octubre es de 1,034 mm, registrada en 1999; y la máxima diaria es de 262 mm registrada el 27 de octubre pero de 1997. Los datos climatológicos de la ciudad de Villahermosa, lugar en donde ocurrió la inundación, y de Ocoatepec, lugar que registró las máximas precipitaciones acumuladas, demuestran que en los últimos 30 años

han ocurrido precipitaciones de una magnitud similar a las registradas a finales de octubre y principios de noviembre del 2007. Esto sugiere que las precipitaciones extremas no son producto del cambio climático sino de las condiciones meteorológicas que, excluyendo las características particulares de cada uno de los sistemas que interaccionaron, pueden ocurrir cualquier año.

# CAPÍTULO 2

## DATOS Y METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se hizo un análisis de las condiciones meteorológicas que causaron los fuertes vientos en el Golfo de México y las precipitaciones en el sureste de la República Mexicana, proporcionando una idea preliminar acerca de la complejidad del evento. Para llevar a cabo un análisis detallado es necesario revisar toda la información meteorológica relacionada con las condiciones prevalecientes, con el propósito de explicar sus causas y la probabilidad de que ocurra un evento similar. Si bien en el trabajo se utiliza como herramienta principal de análisis el modelo numérico WRF, es necesario contar con información que respalde o deseche de manera sólida las conclusiones que se obtengan con los resultados numéricos. Para tal propósito se recolectó una gran cantidad de información de distintas fuentes, la cual se describe en este capítulo. Otra parte importante del desarrollo de este trabajo se concentra en los procedimientos utilizados para abordar el problema y la manera en que se utiliza la información recopilada, pues a través de ellos se trata de llegar al entendimiento de aspectos del tema de estudio, que no pueden ser identificados en primera instancia. Por ello, en este capítulo también se describen las técnicas utilizadas para resolver los objetivos planteados.

### **2.1 Modelo WRF**

El modelo numérico atmosférico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) es un sistema de predicción numérica del tiempo diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas. Es administrado por la comunidad universitaria, científica y operacional, con el fin de dirigir su desarrollo en beneficio de esta comunidad. Diversas instituciones apoyan en proyecto con el objetivo de construir un modelo de pronóstico numérico de mesoescala de siguiente generación

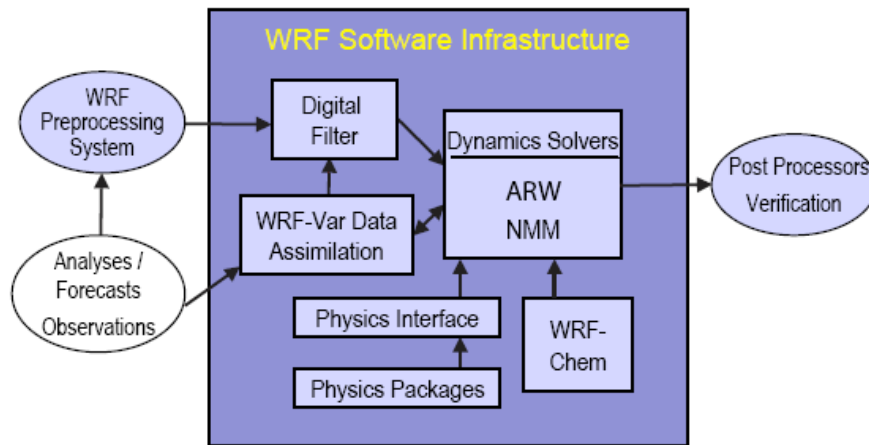


(modelos como el MM5 pertenecen a la generación anterior), para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock, 2008). Las principales instituciones encargadas de su desarrollo son: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Earth System Research Laboratory* (ESRL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Center for Analysis and Prediction Storms* (CAPS) y *Federal Aviation Administration* (FAA).

El código del modelo es abierto a la comunidad y ha sido optimizado de manera que puede ser adaptado, tanto en supercomputadoras que trabajan en paralelo, como en computadoras portátiles de reciente generación. Debido a la diversidad de la comunidad que lo desarrolló y que lo utiliza, el modelo tiene una gran diversidad de aplicaciones, por ejemplo, simulaciones ideales, simulaciones reales (predicción numérica en tiempo real), modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos. En este trabajo se utiliza la versión 3.0, la cual fue liberada por primera vez en abril del 2008.

Los principales componentes del modelo se muestran en la figura 2.1. El *WRF Software Infrastructure* (WSI) contiene los programas que resuelven las ecuaciones de la física del modelo (*dynamic solvers*) y los programas que hacen la interfase con la iniciación del modelo, la asimilación de datos y la utilización de algunas opciones relacionadas con la química atmosférica. Fuera del WSI se encuentra la parte de pre-procesamiento y post-procesamiento de las simulaciones numéricas. El modelo cuenta con dos núcleos que resuelven la física del modelo, el *Advanced Research WRF* (ARW) y el *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), en este trabajo se ha utilizado el núcleo ARW por lo que a continuación se describe brevemente.





**Figura 2.1.** Principales componentes del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock *et al.* (2008).

### 2.1.1 Descripción del núcleo ARW

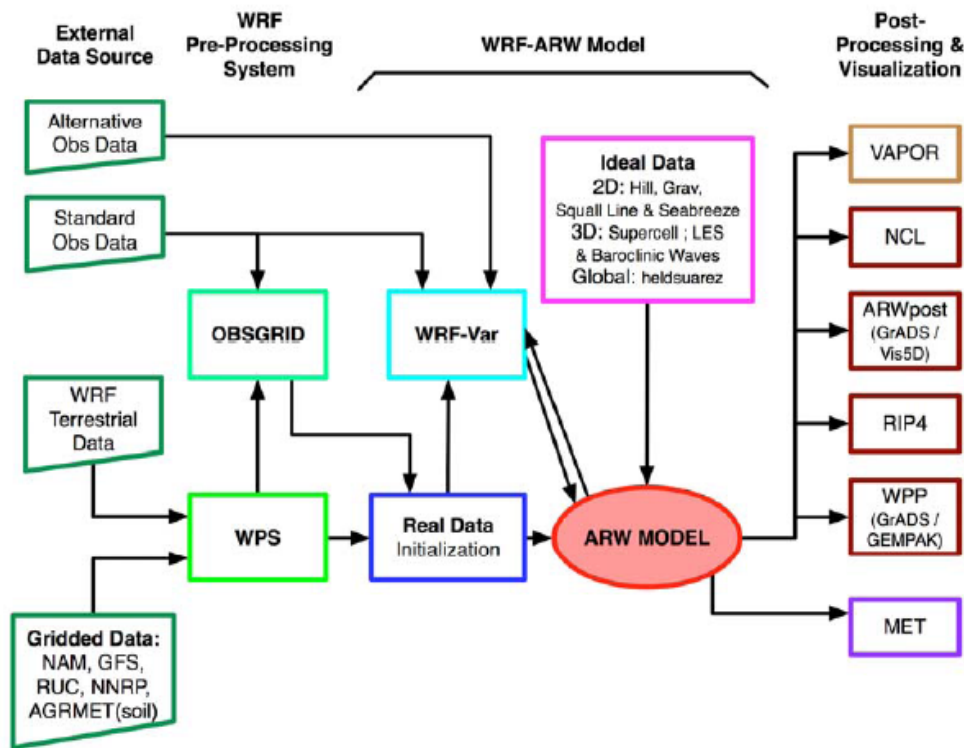
Las características del núcleo ARW, utilizado para resolver los procesos atmosféricos, son las siguientes:

- **Ecuaciones:** Consideran un fluido totalmente compresible, no-hidrostático y basado en flujo Euleriano. Cuenta con una opción hidrostática.
- **Coordenada vertical:** Coordenada que sigue el terreno y que permite un estiramiento en los niveles verticales. El tope del modelo es una superficie de presión constante.
- **Malla horizontal:** Malla escalonada tipo Arakawa C.
- **Integración en tiempo:** Runge-Kutta de 2do y 3er orden con paso de tiempo menor para ondas acústicas y de gravedad.
- **Discretización espacial:** Opcional de 2do y 6to orden en la horizontal y vertical.
- **Condiciones de frontera laterales:** Periódicas, abiertas y simétricas.
- **Condiciones de frontera en superficie:** Física o *free-slip*.
- **Anidamientos:** Interactivos en un sentido, interactivos en dos sentidos y móviles, estos últimos pueden usarse a través de movimientos especificados por el usuario o con un algoritmo que sigue el movimiento de un vórtice.
- **Malla global:** Cuenta con capacidad para realizar simulaciones globales.
- **Microfísica:** Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos

que resuelven explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.

- **Parametrizaciones de cúmulus:** Diversos esquemas para modelos de mesoescala modificados y adaptados para el modelo.
- **Capa límite planetaria:** Esquema de energía cinética turbulenta y esquemas no locales.

La figura 2.2 muestra el diagrama de flujo del modelo WRF, en donde se puede observar que existen 4 pasos necesarios para obtener una simulación numérica con el modelo.



**Figura 2.2.** Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock et al. (2008).

**WRF Preprocessing System (WPS).** Esta componente del modelo es utilizada para simulaciones reales; aquí el usuario puede definir los dominios de la simulación, interpolar los datos terrestres a los dominios (por ejemplo, topografía, tipo de suelo, uso de suelo, etc.), así como decodificar e interpolar los datos meteorológicos que alimentan al modelo.

**WRF-Var.** Este programa es opcional, se encarga de introducir observaciones a los análisis interpolados que fueron creados con el WPS (por ejemplo, datos de superficie, radiosondeos, datos de radar, etc.), generando así una actualización en las condiciones iniciales que utilizará el modelo.

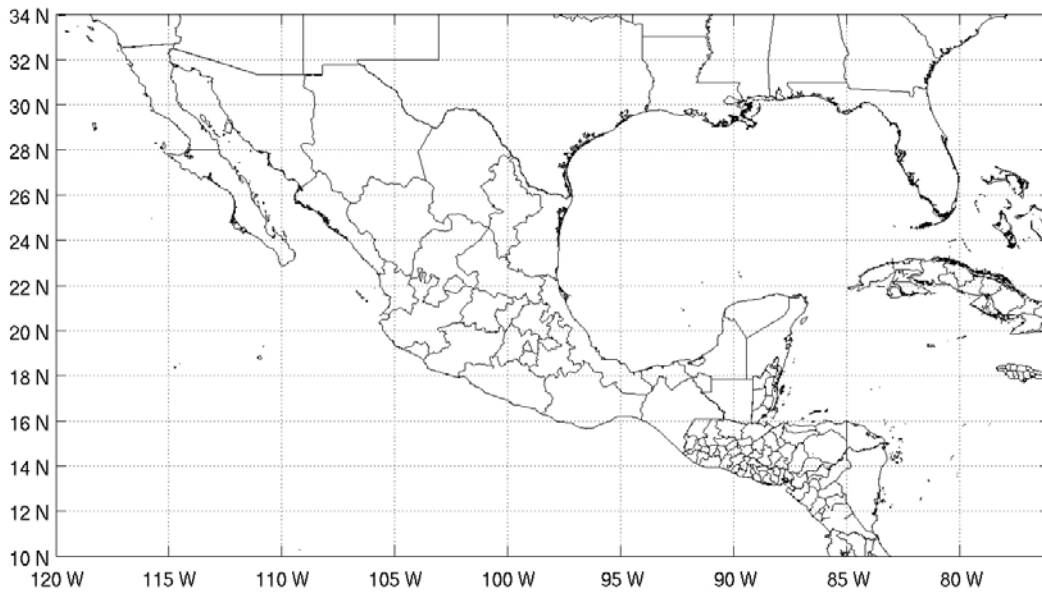
**ARW.** Este es el principal componente del modelo, aquí se realiza la iniciación del modelo para cualquiera de los casos de simulación, ideal o real, y se hace la integración numérica del dominio principal y de los anidamientos, si es el caso.

**Post-procesamiento y visualización.** Esta componente es independiente de los códigos del modelo y queda a consideración del usuario. Existe una gran cantidad de herramientas gráficas que pueden ser utilizadas para visualizar las simulaciones numéricas. Algunas de estas opciones son: *NCAR Command Language* (NCL), *Read/Interpolate/Plot* (RIP4), *Grid Analysis and Display System* (GrADS), *Vis5D*, *Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers* (VAPOR), *General Equilibrium Modelling Software* (GEMPAK) y *MATrix LABoratory* (MATLAB).

### **2.1.2 Configuración del modelo**

El modelo tiene implementadas un gran número de opciones para realizar las simulaciones numéricas en función de las necesidades del usuario, estas opciones permiten seleccionar desde el tipo de proyección a utilizar hasta la manera en que se resuelven los procesos físicos. La configuración usada en este estudio se planeó de manera que pudiera ser utilizada para un pronóstico de tipo operativo para la República Mexicana, por lo que los resultados que se obtienen, además de servir para explicar el caso de estudio, funcionan como una referencia de la aplicación de este modelo en México.

Las simulaciones numéricas que se realizaron para los análisis en este trabajo son producto de la versión 3.0 del modelo con el núcleo ARW. Es importante mencionar que para las fechas en que ocurrió el evento, la versión del modelo que se tenía implementada era la 2.2, la cual fue liberada en diciembre del 2006. De esta manera, las corridas obtenidas para el mes de octubre del 2007 ya estaban generadas con la versión 2.2, sin embargo, con la liberación de la versión 3.0 en abril del 2008, se decidió trabajar con ella por las capacidades que se le agregaron al modelo (Ver UCAR, 2008b). Por lo tanto, las simulaciones numéricas que se analizan corresponden a la versión 3.0 pero con la misma configuración que se usó en la versión 2.2. La malla del modelo consta de un solo dominio centrado en 22.5 °N y 98.5 °W, la dimensión en la dirección este-oeste es de 248 puntos de malla y en la dirección norte- sur es de 162 puntos con una resolución de 20 Km. (Fig. 2.3).



**Figura 2.3.** Dominio utilizado para las simulaciones numéricas con el modelo WRF-3.0.

Se utiliza una proyección Mercator, la coordenada vertical utilizada es sigma (siguiendo el terreno) y tiene 27 niveles; una vez que se obtienen las salidas numéricas estas son interpoladas a niveles verticales de presión. Los esquemas utilizados en la física del modelo son: Kain-Fritsch para la parametrización de cúmulus; Noah LSM (*Land Surface Model*) para el suelo; RRTM para la radiación de onda larga; Dudhia para la radiación de onda corta y el esquema *Yonsei University* (YSU) para la capa límite. Estas parametrizaciones son descritas detalladamente en Skamarock *et al.* (2008).

Las condiciones iniciales y de frontera se tomaron del modelo global GFS, específicamente los datos de las 12Z, que están disponibles operativamente (GFS, 2008). Los análisis finales del NCEP (descritos en el siguiente capítulo) también son comúnmente utilizados como condiciones iniciales en el modelo ya que contienen un número mayor de observaciones con respecto a los que están disponibles en tiempo real, sin embargo, estos no se utilizan para iniciar el modelo debido a que se pretende evaluar el comportamiento de éste realizando simulaciones numéricas con la información que está disponible en tiempo real. No se realiza asimilación de datos además de los del GFS y las condiciones de frontera son impuestas cada 6 horas. La integración en tiempo de cada simulación numérica se hace hasta 72 horas iniciando el modelo a las 12Z en todas las simulaciones con un paso de integración de 120 segundos.

El equipo de cómputo en que está implementado el modelo consta de cuatro procesadores de doble núcleo AMD Opteron y para su instalación se ha utilizado el compilador de fortran PGI 7.2 (PGI, 2008). Con estas características el pronóstico numérico a 72 horas necesita un tiempo aproximado de 90 minutos, aunque el tiempo de procesamiento puede reducirse hasta en un 30% con equipos de cómputo que tienen el mismo número de núcleos pero de reciente generación.

El periodo de las simulaciones numéricas elegido para el análisis de este trabajo comprende del 1 de octubre al 5 de noviembre, considerando que el evento a analizar ocurrió dentro de ese intervalo y que las observaciones de precipitación, descritas en la siguiente sección, están restringidas a ese periodo de tiempo.

## **2.2 Bases de datos**

Para este trabajo se utilizaron diversas fuentes de datos que se consideraron adecuadas para realizar el proceso de validación y el análisis del evento. El conjunto de datos incluye las *Estaciones Meteorológicas Automáticas* (EMAS) del SMN, boyas del *National Data Buoy Center* (NDBC), estaciones hidrometeorológicas de la *Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos* (GASIR), análisis finales y reanálisis administrados por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y datos de precipitación estimada por medio de satélite bajo el proyecto *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). A continuación se describe cada una de las bases de datos.

### **2.2.1 Estaciones del SMN**

El SMN administra la red de EMAS que pertenece a la *Comisión Nacional del Agua* (CNA). Actualmente, la red está conformada por 133 estaciones y la información meteorológica reciente de las estaciones está disponible a cualquier usuario en su sitio electrónico (SMN, 2008). Para este trabajo se recolectó la información meteorológica de 105 estaciones que contienen la información meteorológica del año 2007. Después de hacer una revisión de cada una de las estaciones con el fin de desechar aquellas que no contaran con información suficiente para el periodo de interés, el conjunto final fue de 72 estaciones. La lista de las estaciones seleccionadas se muestra en la Tabla 2.1 y su ubicación se muestra en la figura 2.4. Las variables medidas por estas estaciones son: dirección e intensidad del viento sostenido, dirección e intensidad de la ráfaga del viento,

temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, precipitación y radiación solar. El intervalo de muestreo es de 10 minutos. Los datos de temperatura son utilizados en la validación del modelo, usando datos horarios puntuales sin promediar.

**Tabla 2.1.** Lista de las estaciones meteorológicas del SMN y de las boyas del NDBC incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.

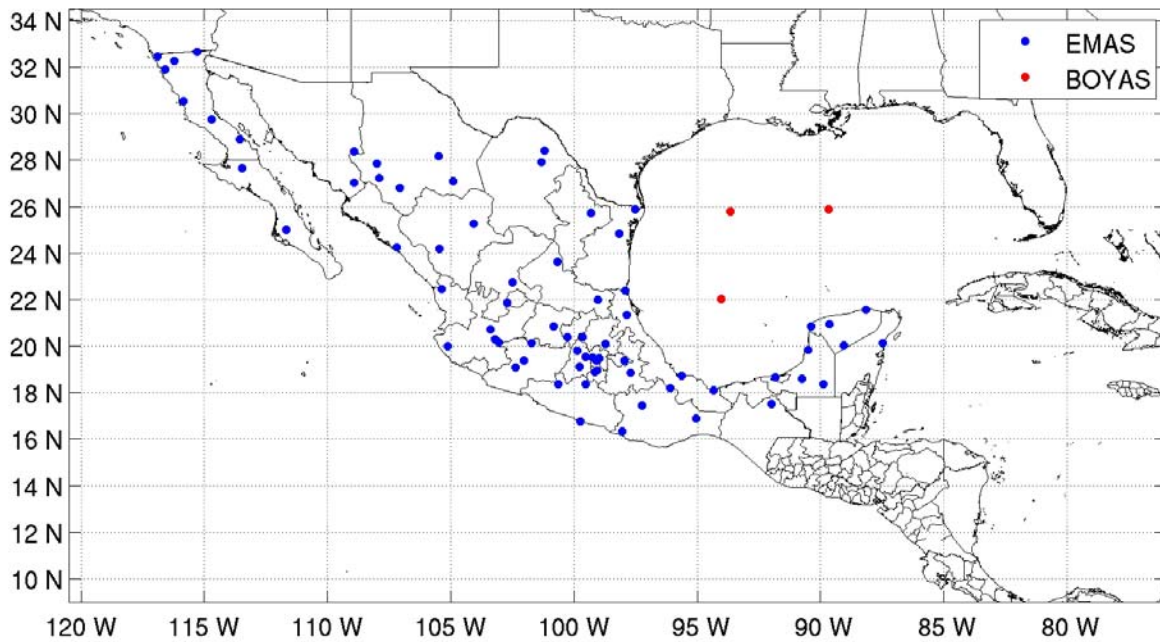
FUENTE	ENTIDAD	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	AGUASCALIENTES	CALVILLO	21	50	58	102	42	44	1618
SMN	BAJA CALIFORNIA	PRESA ABELARDO	32	26	50	116	54	30	156
SMN	BAJA CALIFORNIA	PRESA EMILIO	31	53	29	116	36	12	32
SMN	BAJA CALIFORNIA	MEXICALI	32	40	1	115	17	27	50
SMN	BAJA CALIFORNIA	SAN QUINTÍN	30	31	54	115	50	15	32
SMN	BAJA CALIFORNIA	BAHÍA DE LOS ÁNGELES	28	53	47	113	33	37	10
SMN	BAJA CALIFORNIA	CATAVIÑA	29	43	38	114	43	9	514
SMN	BAJA CALIFORNIA	LA RUMOROSA	32	16	20	116	12	20	1262
SMN	BAJA CALIFORNIA SUR	CD. CONSTITUCIÓN	25	0	35	111	39	48	28
SMN	BAJA CALIFORNIA SUR	GUSTAVO DÍAZ ORDAZ	27	38	34	113	27	27	37
SMN	CAMPECHE	CD. DEL CARMEN	18	38	53	91	49	21	8
SMN	CAMPECHE	CAMPECHE	19	50	10	90	30	26	11
SMN	CAMPECHE	CALAKMUL	18	21	54	89	53	33	28
SMN	CAMPECHE	ESCÁRCEGA	18	36	30	90	45	14	60
SMN	CHIAPAS	PALENQUE	17	31	33	91	59	25	52
SMN	CHIHUAHUA	GUACHOCHI	26	48	49	107	4	23	2390
SMN	CHIHUAHUA	URIQUE	27	12	56	107	55	1	577
SMN	CHIHUAHUA	MAGUARICHI	27	51	30	107	59	40	1663
SMN	CHIHUAHUA	CD. DELICIAS	28	10	12	105	30	0	1188
SMN	CHIHUAHUA	JIMÉNEZ	27	6	39	104	54	23	1360
SMN	COAHUILA	NUEVA ROSITA	27	55	12	101	19	48	366
SMN	COAHUILA	SANTA CECILIA	28	23	58	101	12	47	595
SMN	DISTRITO FEDERAL	ENCB	19	27	13	99	10	16	2389
SMN	DISTRITO FEDERAL	TEZÓNTLE	19	23	7	99	5	59	2358
SMN	DURANGO	LAS VEGAS	24	11	9	105	27	58	2398
SMN	DURANGO	AGUSTÍN MELGAR	25	15	48	104	3	58	1226
SMN	GUANAJUATO	PRESA ALLENDE	20	50	54	100	49	29	1915
SMN	GUERRERO	ACAPULCO	16	45	48	99	44	56	7.5
SMN	GUERRERO	CD. ALTAMIRANO	18	21	2	100	39	30	251
SMN	GUERRERO	IGUALA	18	21	37	99	31	27	780

Continuación de la Tabla 2.1.

FUENTE	UBICACIÓN	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	HIDALGO	PACHUCA	20	5	49	98	42	51	2423
SMN	HIDALGO	HUICHAPAN	20	23	19	99	39	50	2080
SMN	JALISCO	CHAPALA	20	17	25	103	12	6	1493
SMN	JALISCO	TIZAPAN	20	10	10	103	2	38	1503
SMN	JALISCO	LOS COLOMOS	20	42	24	103	23	34	1571
SMN	JALISCO	RIO TOMATLÁN	19	59	55	105	8	1	141
SMN	MEXICO	CERRO CATEDRAL	19	32	31	99	31	9	3754
SMN	MEXICO	PRESA MADÍN	19	31	28	99	16	5	2364
SMN	MEXICO	ATLACOMULCO	19	47	30	99	52	11	2600
SMN	MEXICO	NEVADO DE TOLUCA	19	7	0	99	46	0	4139
SMN	MEXICO	CEMCAS	19	28	47	98	58	25	2176
SMN	MICHOACÁN	ANGAMACUTIRO	20	7	31	101	43	21	1730
SMN	MICHOACÁN	APATZINGÁN	19	4	58	102	22	18	282
SMN	MICHOACÁN	URUAPAN	19	22	51	102	1	44	1606
SMN	MORELOS	IMTA	18	52	56	99	9	25	1355
SMN	MORELOS	TEPOZTLÁN	18	57	3	99	4	44	1384
SMN	NAYARIT	ACAPONETA	22	27	59	105	23	7	29
SMN	NUEVO LEÓN	PRESA EL CUCHILLO	25	43	59	99	19	15	134
SMN	OAXACA	PINOTEPA NACIONAL	16	20	59	98	3	9	195
SMN	OAXACA	MATÍAS ROMERO	16	52	58	95	2	11	186
SMN	OAXACA	NOCHISTLAN	17	26	12	97	14	57	2040
SMN	PUEBLA	TEC TECAMACHALCO	18	51	59	97	43	18	2047
SMN	QUERÉTARO	HUIMILPAN	20	23	25	100	17	1	2280
SMN	QUINTANA ROO	SIAN KAAAN	20	7	40	87	27	56	8
SMN	SAN LUIS POTOSÍ	MATEHUALA	23	36	51	100	39	57	1627
SMN	SAN LUIS POTOSÍ	CD. VALLES	21	58	47	99	1	51	58
SMN	SINALOA	OBISPO	24	15	4	107	11	17	4
SMN	SONORA	ALAMOS	27	1	18	108	56	16	409
SMN	SONORA	YECORA	28	22	0	108	55	0	1531
SMN	TAMAULIPAS	ALTAMIRA	22	23	15	97	55	32	61

Continuación de la Tabla 2.1.

FUENTE	UBICACIÓN	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	TAMAULIPAS	MATAMOROS	25	53	9	97	31	7	4
SMN	TAMAULIPAS	SAN FERNANDO	24	50	34	98	9	27	45
SMN	TLAXCALA	HUAMANTLA	19	23	0	97	57	0	2222
SMN	VERACRUZ	ALVARADO	18	42	54	95	37	57	113
SMN	VERACRUZ	CD. ALEMAN	18	11	21	96	5	51	107
SMN	VERACRUZ	PRESA LA CANGREJERA	18	6	21	94	19	53	34
SMN	VERACRUZ	CITLALTEPEC	21	20	4	97	52	43	211
SMN	YUCATÁN	MÉRIDA	20	56	47	89	39	6	18
SMN	YUCATÁN	CELESTÚN	20	51	29	90	22	59	10
SMN	YUCATÁN	RÍO LAGARTOS	21	34	16	88	9	37	5
SMN	YUCATÁN	TANTAQUÏN	20	1	49	89	2	50	30
SMN	ZACATECAS	ZACATECAS	22	44	48	102	30	22	2270
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42001	25	54	0	89	40	0	0
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42002	25	47	24	93	39	58	0
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42055	22	1	2	94	2	45	0



**Figura 2.4.** Ubicación geográfica de las 72 EMAS (azul) del SMN y de las tres boyas (rojo) del NDBC.



### **2.2.2 Boyas del NDBC**

Los datos de las boyas fueron obtenidos del sitio electrónico del NDBC y para el análisis se utilizan los datos horarios correspondientes al año 2007. Se seleccionaron tres boyas que se encuentran en el Golfo de México con el objetivo de analizar los vientos en el mes de octubre y sobre todo los provocados por el frente frío número 4 en la región oceánica. Las coordenadas de estas boyas se muestran al final de la tabla 2.1 y su localización se muestra en la figura 2.4. Las boyas registran las siguientes variables: dirección e intensidad del viento a 10 m, dirección e intensidad de la ráfaga, altura de ola significativa, periodo dominante de ola, periodo promedio de ola, dirección promedio de ola, presión barométrica, temperatura del aire, temperatura superficial del mar, temperatura de punto de rocío, visibilidad y tendencia de la presión.

### **2.2.3 Estaciones de la GASIR**

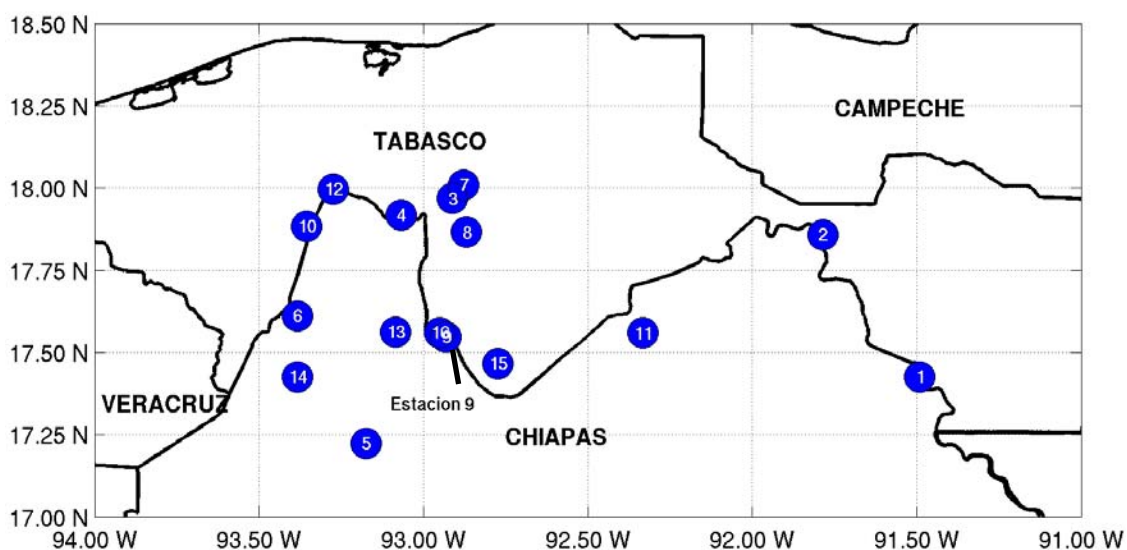
Las estaciones hidrometeorológicas de la GASIR utilizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 2.2 y en la figura 2.5. Estas estaciones están colocadas en los márgenes de los ríos y registran las siguientes variables: nivel del río, precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento así como velocidad y dirección de la ráfaga. El intervalo de muestreo de estas estaciones es de 10 minutos. Se consiguieron los datos para el mes de octubre y los primeros días de noviembre del 2007, que cubren el periodo del evento a estudiar. Los datos son utilizados para hacer una evaluación de las precipitaciones que reproduce el modelo en los estados de Tabasco y Chiapas.

### **2.2.4 Datos de TRMM**

Esta fuente de datos contiene estimaciones de la precipitación sobre las regiones tropicales obtenidas por medio de sensores colocados en un satélite. Existen varios productos que pueden ser obtenidos a través del sitio electrónico. Para este trabajo se utilizó el producto 3B42, el cual contiene la razón de precipitación estimada en un lapso de 3 horas, sobre una malla regular con una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , con una extensión en latitud de  $50^\circ$  norte a  $50^\circ$  sur (TRMM, 2007). Los datos son utilizados para compararlos con la precipitación que el modelo reproduce sobre Veracruz, Chiapas y Tabasco.

**Tabla 2.2.** Lista de las estaciones meteorológicas de la GASIR incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.

NUM	ENTIDAD	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
1	TABASCO	BOCA DEL CERRO	17	25	32	91	29	31	36
2	TABASCO	E. ZAPATA	17	51	26	91	47	7	33
3	TABASCO	GAVIOTAS	17	58	3	92	54	41	14
4	TABASCO	GONZÁLEZ	17	55	3	93	4	6	7.11
5	CHIAPAS	OCOTEPEC	17	13	21	93	10	28	1400
6	CHIAPAS	PLATANAR	17	36	39	93	23	2	34.6
7	TABASCO	PORVENIR	18	0	32	92	52	38	18.81
8	TABASCO	PUEBLO NUEVO	17	51	55	92	52	7	8.12
9	TABASCO	PUYACATENGO	17	32	47	92	55	50	62
10	TABASCO	REFORMA	17	52	58	93	21	22	28.79
11	TABASCO	SALTO DE AGUA	17	33	31	92	19	58	26
12	TABASCO	SAMARIA	17	59	49	93	16	32	20.16
13	CHIAPAS	SAN JOAQUIN	17	33	40	93	5	6	28.15
14	CHIAPAS	SAYULA	17	25	30	93	23	0	133
15	TABASCO	TAPIJULAPA	17	27	56	92	46	24	24.55
16	TABASCO	TEAPA	17	33	35	92	57	3	48.31



**Figura 2.5.** Ubicación geográfica de las estaciones de la GASIR.

### **2.2.5 Análisis finales del NCEP**

Los análisis finales son generados por el *Global Data Assimilation System* (GDAS), el cual es utilizado por el NCEP de manera operacional 4 veces al día, por lo que la resolución temporal de estos productos es de 6 horas. Los análisis que se obtienen operacionalmente consideran todas las observaciones que han sido reportadas de manera global en tiempo real, mientras que los análisis finales reúnen las observaciones que no pudieron ser consideradas debido a retrasos, de esta manera su información acerca de las condiciones atmosféricas es mejor representada, pero no están disponibles en tiempo real. Existe un gran número de variables atmosféricas en esta base de datos y se encuentran distribuidos en niveles verticales sobre una malla regular global de  $1^\circ \times 1^\circ$  (CISL, 2008). Estos datos son usados principalmente para comparar los campos de viento y humedad que genera el modelo para el caso de estudio.

### **2.2.6 Datos del reanálisis NCEPR2**

Los llamados reanálisis son el resultado de modelos numéricos que utilizan observaciones de distintas fuentes para reconstruir las condiciones históricas del estado del tiempo en escala global. En este trabajo se utilizan datos del Reanálisis 2 del NCEP/*Department of Energy* para el *Atmospheric Model Intercomparison Project* (NCEP/DOE AMIP II) o NCEPR2 (Kanamitsu *et al.*, 2002). Existe un gran número de variables atmosféricas en esta base de datos pero aquí sólo se utilizan los datos de viento para caracterizar la intensidad de los vientos en el caso de estudio. Cabe señalar que la resolución espacial del NCEPR2 es baja, de aproximadamente  $2^\circ$ , de manera que no se pueden analizar fenómenos que sucedan en una escala espacial de decenas de kilómetros. Sin embargo, recupera las condiciones de sistemas de mesoescala como los frentes fríos. Además, tiene la ventaja de proporcionar series de datos continuas durante periodos de tiempo relativamente largos con una resolución temporal de 6 horas (CISL, 2008).

### **2.2.7 Imágenes satelitales**

Además de las bases de datos descritas anteriormente se utilizan imágenes infrarrojas y visibles del satélite GOES para ayudar a describir el evento meteorológico.

## 2.3 Metodología

Las bases de datos que fueron descritas anteriormente se usan en las distintas etapas de este trabajo de investigación. Para la validación del modelo se utilizaron técnicas estadísticas que han sido empleadas por diversos autores, entre ellos Willmott (1982), Stauffer y Seaman (1990), Brooks y Doswell (1996), Pielke (2001) y Wilks (2006). Los estadísticos utilizados son: el error cuadrático medio, error promedio absoluto, error promedio absoluto normalizado, sesgo y correlación compleja. A continuación se describe cada uno de ellos.

### 2.3.1 Estadísticos

**Coefficiente de correlación lineal.** Este parámetro proporciona el grado de relación lineal que existe entre dos variables  $\Phi$  y  $\Phi_{\text{obs}}$ , donde a cada valor de  $\Phi$  le corresponde uno de  $\Phi_{\text{obs}}$ . La expresión para calcularla es:

$$\text{Correlación} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_i - \bar{\Phi}) (\Phi_{i\text{obs}} - \bar{\Phi}_{\text{obs}})}{(N-1) S_{\Phi} S_{\Phi_{\text{obs}}}}$$

donde:  $\Phi$  representa los valores pronosticados y  $\Phi_{\text{obs}}$  los observados,  $\bar{\Phi}$  es el promedio de los valores pronosticados,  $\bar{\Phi}_{\text{obs}}$  el promedio de los valores observados,  $S_{\Phi}$  y  $S_{\Phi_{\text{obs}}}$  las desviaciones estándar y  $N$  el número total de datos. En los siguientes estadísticos  $\Phi$  y  $\Phi_{\text{obs}}$  tienen el mismo significado.

**Error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE).** Indica el grado de correspondencia promedio entre pares individuales de valores pronosticados y observados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_i - \Phi_{i\text{obs}})^2}{N}}$$

**Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error, MAE).** Es una medida de la cercanía entre los valores pronosticados y los observados.

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^N \frac{|\Phi_i - \Phi_{\text{io}}|}{N}$$

**Error Absoluto Medio Normalizado (Normalized Mean Absolute Error, NMAE).** Similar al MAE pero aquí se toma en cuenta el peso del error respecto al rango de variación de la variable medida.

$$\text{NMAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |\Phi_i - \Phi_{\text{io}}| / |\Delta_{\Phi_{\text{io}}}|}{N}$$

donde:  $\Delta_{\Phi_{\text{io}}} = |\max(\Phi_{\text{io}}) - \min(\Phi_{\text{io}})|$ , representa el rango de variación de las temperaturas observadas, en este caso del ciclo diurno debido a que los estadísticos se calculan en periodos de 24 horas.

**Sesgo (Mean Error o BIAS).** Proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar.

$$\text{BIAS} = \sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_i - \Phi_{\text{io}})}{N}$$

Los estadísticos anteriores funcionan para el caso de variables escalares, sin embargo el caso del viento merece especial atención por ser un vector. Kundu (1976) propone un método para correlacionar series bidimensionales que puede aplicarse al viento y Jorba *et al.* (2005) utilizan una variante del error cuadrático medio para la magnitud del viento (RMSEV), mientras que para describir los pronósticos de la dirección utiliza el RMSED y para el sesgo el BIASD. Para calcular el sesgo de la magnitud del viento se utiliza la expresión aplicada a los escalares.

**Correlación compleja.** De acuerdo con Kundu (1976), la correlación compleja es un método para obtener la relación entre el ángulo y la magnitud de dos vectores, en este caso los vientos observados y pronosticados. Las dos series de tiempo son representadas por la siguiente expresión:

$$\Phi(t) = u(t) + i v(t)$$

$$\Phi_{\text{obs}}(t) = u_{\text{obs}}(t) + i v_{\text{obs}}(t)$$

donde:  $u$ ,  $v$  y  $u_{\text{obs}}$ ,  $v_{\text{obs}}$  representan las componentes del viento pronosticado y observado, respectivamente.

El índice de correlación ( $\rho$ ) está dado entonces por:

$$\rho = \frac{[\Phi^*(t) \Phi_{\text{obs}}(t)]}{[\Phi^*(t) \Phi(t)]^{1/2} [\Phi_{\text{obs}}^*(t) \Phi_{\text{obs}}(t)]^{1/2}}$$

donde:  $\Phi^*$  indica el complejo conjugado de  $\Phi$ .

**Error cuadrático medio para la magnitud del viento (RMSEV).**

$$\text{RMSEV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(u_i - u_{i\text{obs}})^2 + (v_i - v_{i\text{obs}})^2]}{N}}$$

**Error cuadrático medio para la dirección del viento (RMSED).**

$$\text{RMSED} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{D^2}{N}}$$

$$D = \min ( |d_i - d_{i\text{obs}}| , |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})| )$$

donde:  $d_i$  es la dirección del viento pronosticado y  $d_{i\text{obs}}$  la dirección observada.

### Sesgo para la dirección del viento (BIASD).

$$\text{BIASD} = \sum_{i=1}^N \frac{D}{N}$$

Si  $d_i < d_{i\text{obs}}$ :

$$D = d_i - d_{i\text{obs}} \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| < |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})|$$

$$D = 360 + (d_i - d_{i\text{obs}}) \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| > |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})|$$

Si  $d_i > d_{i\text{obs}}$ :

$$D = d_i - d_{i\text{obs}} \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| < |(d_i - d_{i\text{obs}}) - 360|$$

$$D = (d_i - d_{i\text{obs}}) - 360 \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| > |(d_i - d_{i\text{obs}}) - 360|$$

Para este estadístico, el error está definido en función de la dirección del vector observado, de esta manera, un BIAS positivo indica que el vector pronosticado se encuentra a un número determinado de grados moviéndose en dirección de las manecillas del reloj y un BIAS negativo indica que el vector pronosticado se encuentra a un número determinado de grados moviéndose en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Para mayor simplicidad, en el capítulo referente a la validación, el primer caso (BIAS positivo) se referirá como un vector pronosticado a la derecha del observado y el segundo (BIAS negativo) como un vector pronosticado a la izquierda del observado.

# CAPÍTULO 3

## VALIDACIÓN DEL MODELO WRF

En el área de la meteorología, más precisamente en la rama de la predicción numérica del tiempo, existe un amplio número de modelos utilizados para entender el desarrollo de los fenómenos atmosféricos y su evolución en el tiempo. En los últimos años la utilización de estos modelos se ha incrementado, en parte por el mejor entendimiento que se ha tenido de los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, y otro tanto por el avance computacional que ha permitido realizar, de manera más rápida, el gran número de operaciones necesarias para resolver las ecuaciones que constituyen a los modelos.

El desarrollo de un modelo numérico refleja un intento por conocer las condiciones que generará un evento en particular, en lugar de permanecer en un total desconocimiento acerca de su evolución. Sin embargo, el uso de los modelos requiere conocer cuáles son las habilidades que tiene para reproducir un fenómeno, cuáles sus desventajas y limitaciones, y cuál es el valor que se le puede adjudicar a los resultados obtenidos. A través de estas preguntas surge la idea de evaluar a los modelos, con el objetivo de saber si proporcionan información adecuada para las necesidades y decisiones de un usuario.

Jolliffe y Stjepenson (2003) mencionan que las primeras técnicas de verificación de pronósticos fueron realizadas por Finley (1884), quien dirigió su trabajo a evaluar el pronóstico de tornados de manera binaria, es decir, calificó la calidad de un pronóstico considerando el hecho de que un tornado haya ocurrido o no y si éste fue o no pronosticado. Desde entonces a la fecha se han seguido desarrollando técnicas de evaluación que consideran las diversas escalas espaciales y temporales de los fenómenos atmosféricos, y que han evolucionando a la par de los modelos numéricos, volviéndose tan complejas como los mismos modelos.



La evaluación del modelo se realiza siguiendo una metodología basada en técnicas estadísticas. Cabe aclarar que la validación o evaluación del modelo WRF que aquí se hace no pretende describir todas las ventajas y desventajas de un pronóstico realizado con el modelo, sin embargo, puede ser de gran utilidad para analizar el desempeño del modelo en un periodo de tiempo que incluye la ocurrencia de un evento característico de otoño-invierno que afecta frecuentemente a la República Mexicana.

### **3.1 Consideraciones generales**

El proceso de validación de las simulaciones numéricas utilizadas en este trabajo consiste en calcular una serie de estadísticos (detallados en el capítulo anterior) que describen cuantitativamente los pronósticos de temperatura y viento del modelo WRF. Para ello, se utiliza un conjunto de 72 estaciones del SMN y 3 boyas del NDBC (ver Tabla 2.1 y Fig. 2.4). Para comparar ambos conjuntos de datos se interpolaron los datos del modelo a las coordenadas geográficas de las estaciones o boyas, según sea el caso. El periodo de análisis abarca del 1 de octubre al 5 de noviembre del 2007, que aunque es un periodo de tiempo relativamente corto, proporciona algunos resultados útiles acerca del desempeño del modelo al aplicarlo a la República Mexicana.

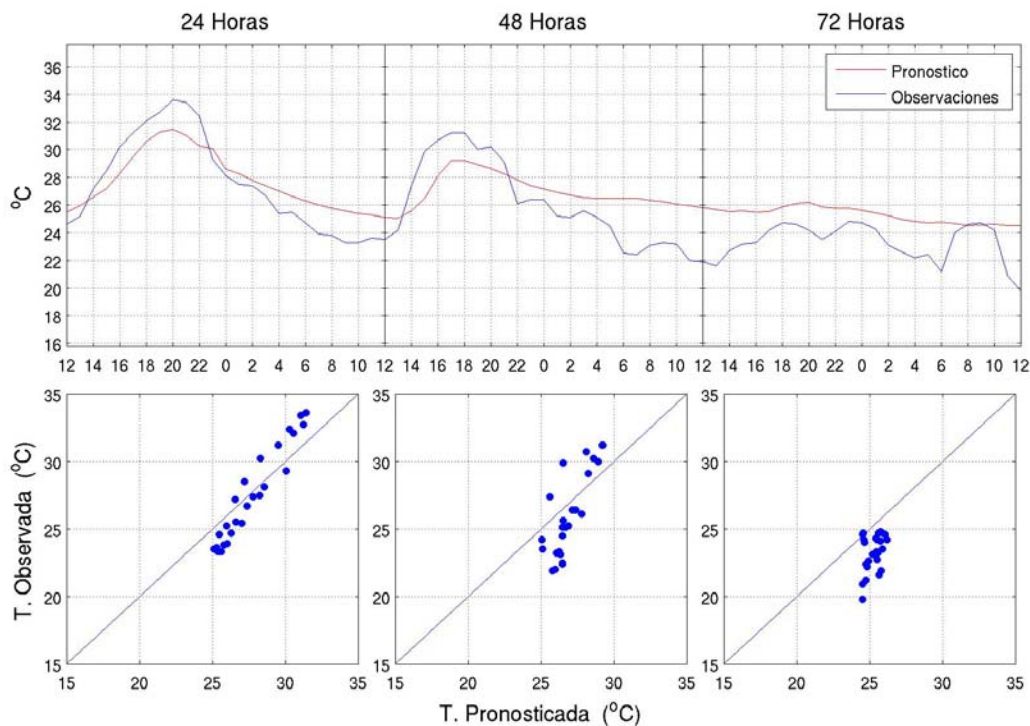
Para el análisis de temperatura se utilizan las estaciones meteorológicas del SMN y los estadísticos utilizados en este caso fueron: correlación lineal, RMSE, MAE, NMAE y BIAS. En el análisis de viento se utilizan los datos de las boyas del NDBC y los estadísticos utilizados fueron: correlación compleja, RMSEV, BIASV, RMSED y BIASD. Los cálculos se realizaron de manera que para cada estación se evaluó el desempeño del modelo durante todo el periodo de análisis. Posteriormente se promediaron los estadísticos de todos los sitios para evaluar los pronósticos en la República Mexicana.

El análisis de la precipitación no es incluido en la validación del modelo por dos razones. La primera tiene que ver con el hecho de que la precipitación es una de las variables más difíciles de pronosticar, tanto en cantidad como en distribución espacial; debido a que el modelo cuenta con una resolución de 20 Km. y la variabilidad espacial de la precipitación puede ser muy grande, realizar una interpolación sobre el campo de precipitación del modelo puede no ser representativa de los 20 Km. La segunda razón tiene que ver con la disponibilidad de las observaciones, ya que el número de

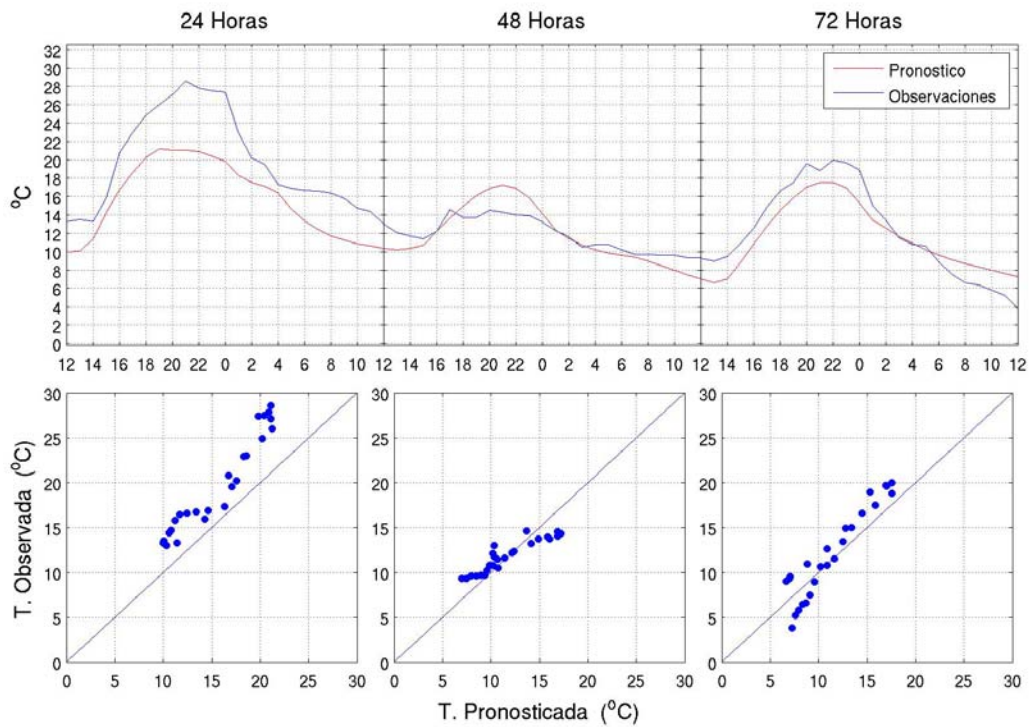
estaciones de la GASIR y la dispersión de éstas en la región de interés, no permiten aplicar un esquema de verificación detallado a esta variable. A pesar de estas limitaciones, en el capítulo 4 se hace un análisis detallado comparando las precipitaciones del modelo con las estimadas por satélite y con las observaciones de las estaciones.

### 3.2 Temperatura a 2 metros: Casos particulares

Antes de discutir la verificación del modelo en el periodo de estudio, se presentan algunos casos particulares que permiten analizar detalles acerca del funcionamiento del modelo durante el paso del frente frío. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran los datos observados de temperatura y los pronosticados por el modelo en las estaciones de Campeche, Camp. y Angamacutiro, Mich., respectivamente. Para ambos casos se presenta el pronóstico a 72 horas a partir del día 22 de Octubre del 2007 a las 12Z, el cual reproduce la entrada del frente frío número 4. Se muestran las series de temperatura de los datos observados y pronosticados en intervalos de 24 horas, así como sus respectivos diagramas de dispersión. Los estadísticos correspondientes se muestran en la Tabla 3.1.



**Figura 3.1.** Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Campeche, Camp., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados (azul) y pronosticados por el modelo (rojo) en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura.



**Figura 3.2.** Similar a la figura 3.1 pero para la estación de Angamacutiro, Mich.

**Tabla 3.1.** Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z.

Estación	Pronóstico	Estadísticos			
		Corr. lineal	RMSE	MAE	BIAS
Campeche	24	0.97	1.6	1.4	0.2
	48	0.80	2.4	2.2	0.9
	72	0.38	2.4	2.0	2.0
Angamacutiro	24	0.96	4.5	4.1	-4.1
	48	0.92	1.6	1.3	-0.1
	72	0.94	2.0	1.9	-0.7

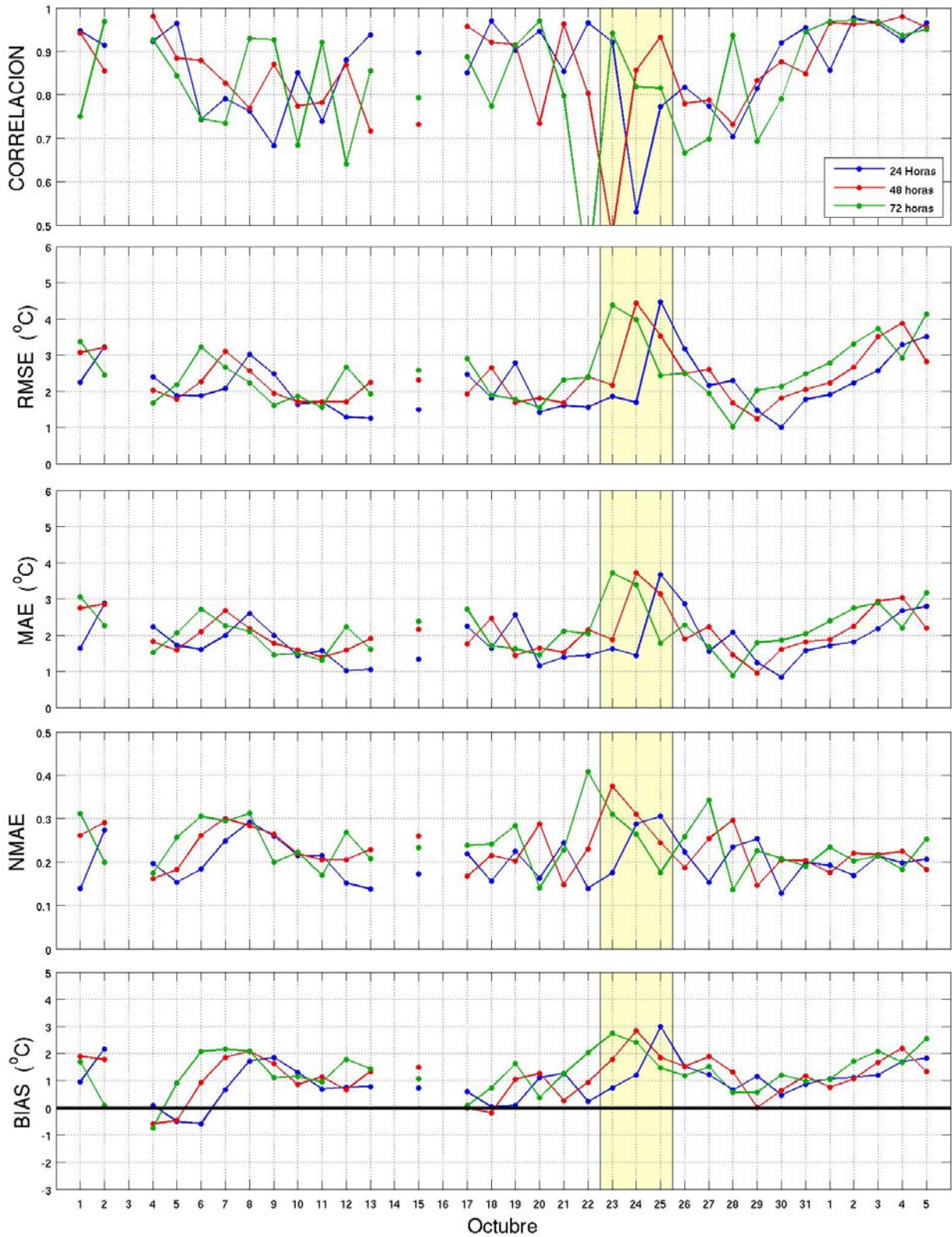
En la figura 3.1 se presenta el pronóstico en Campeche, que es una estación localizada muy cerca de la costa sur del Golfo de México. Los estadísticos de la Tabla 3.1 indican que para las primeras 48 horas de pronóstico la correlación es igual o superior a 0.80, lo cual significa que el modelo logra reproducir el ciclo diurno y el descenso de temperatura ocasionado por la entrada del sistema de mesoescala. Sin embargo, el descenso de temperatura se muestra más suavizado de lo que indican

las observaciones y el valor de correlación disminuye a 0.38 para las últimas 24 horas. Esto puede ser debido a que la resolución del modelo es suficiente para reproducir los sistemas de mesoescala y su influencia en la temperatura, pero insuficiente para reproducir fenómenos atmosféricos de menor escala que influyen en tal variación. El RMSE, MAE y BIAS son menores en las primeras 24 horas y se incrementan conforme el alcance del pronóstico. El error más notable para este caso es que el modelo sobrestima la temperatura en las últimas 24 horas ya que el BIAS tiene un valor de 2°C, en otras palabras, significa que el modelo subestima el descenso de temperatura provocado por la masa de aire frío.

En la figura 3.2 se muestra el caso de la estación de Angamacutiro, la cual está ubicada a 1730 msnm al norte de Michoacán. La Tabla 3.1 muestra correlaciones superiores a 0.90 en todo el periodo pronosticado, indicando que el modelo reproduce con mayor precisión la variabilidad de la temperatura en este sitio. El error cuadrático es mayor en las primeras 24 horas con un valor de 4.5°C, debido a que el modelo no reproduce con precisión los máximos y mínimos observados; este error disminuye en las siguientes 24 horas a menos de 2°C. Los diagramas de dispersión muestran una buena relación entre ambos conjuntos de datos y el BIAS indica que la temperatura es subestimada en todo el periodo de pronóstico, sobre todo en las primeras 24 horas. Este ejemplo muestra el funcionamiento del modelo en puntos geográficos ubicados en el interior del país y rodeados por una topografía que influye en la dinámica atmosférica, aunque no se puede inferir que sea representativo de todos los sitios con esas características.

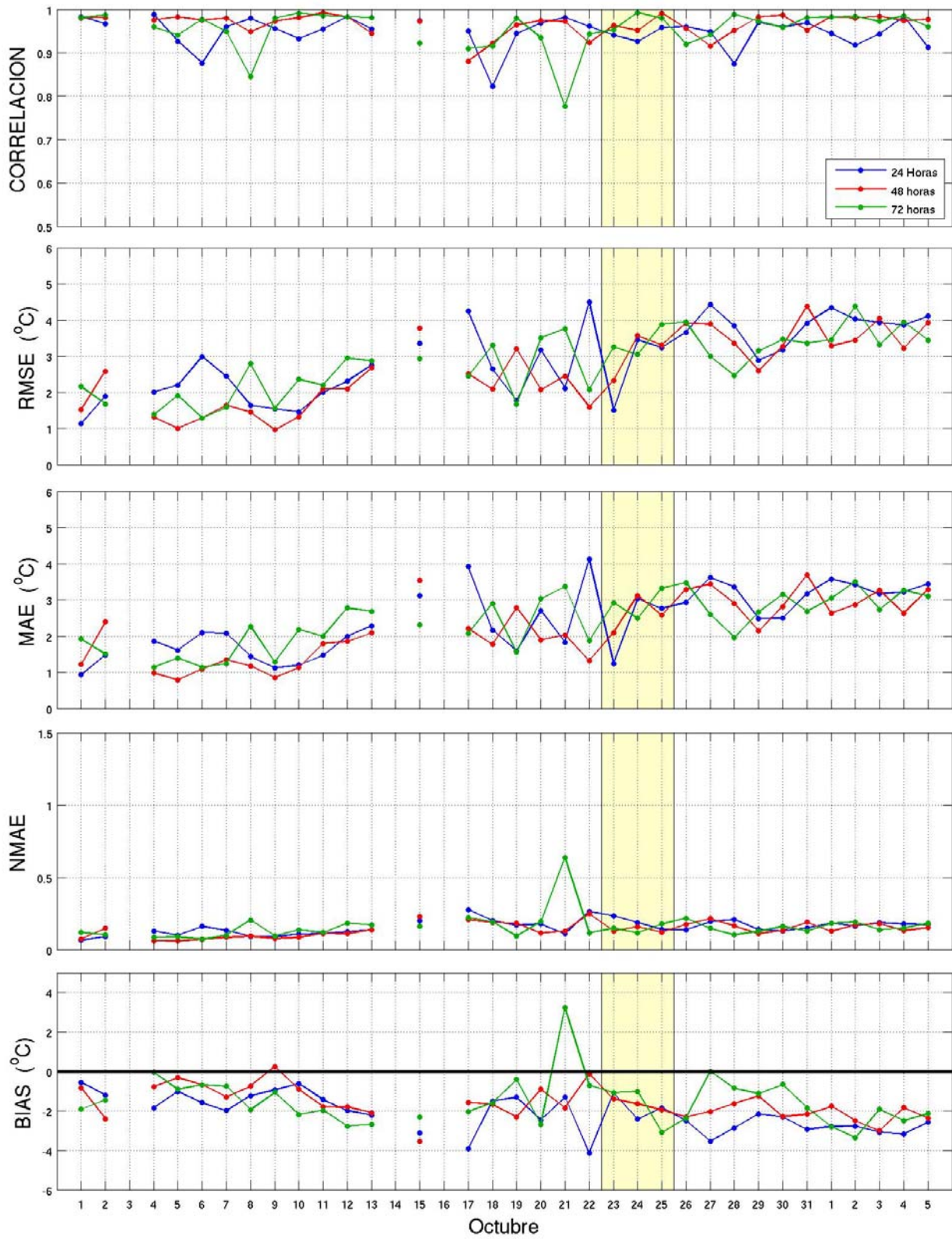
El breve análisis anterior muestra que el modelo reproduce bien los efectos del frente frío pues se muestran correlaciones superiores a 0.90 y errores, tanto de RMSE como de MAE, menores a 2°C en distintas etapas del pronóstico. En cuanto a las deficiencias del modelo se pueden rescatar dos aspectos importantes; primero, en el caso de Campeche el modelo no logra reproducir las variaciones de mayor frecuencia; segundo, en el caso de Angamacutiro el modelo muestra ciertas deficiencias para reproducir los máximos y mínimos de los datos observados.

Las figuras 3.3 y 3.4 presentan el desempeño del modelo del 1 de octubre al 5 de noviembre en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Para cada día se muestra el valor de los estadísticos para las próximas 24, 48 y 72 horas. Los huecos en las series son debidos a que no se pudo realizar la simulación numérica por problemas con la disposición de las condiciones iniciales. Los promedios de los estadísticos en todo el periodo de tiempo considerado se muestran en la Tabla 3.2.



**Figura 3.3.** Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Campeche, Camp. El área amarilla representa las 72 horas de pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.





**Figura 3.4.** Similar a la figura 3.3 pero para la estación de Angamacutiro, Mich.

**Tabla 3.2.** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro.

Estación	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. lineal	RMSE	MAE	NMAE	BIAS
Campeche	24	0.86	2.2	1.9	0.20	1.0
	48	0.85	2.4	2.0	0.23	1.2
	72	0.83	2.5	2.1	0.24	1.3
Angamacutiro	24	0.95	2.9	2.5	0.16	-2.1
	48	0.97	2.6	2.2	0.14	-1.6
	72	0.95	2.8	2.4	0.16	-1.5

El aspecto más claro que se observa en las figuras 3.3 y 3.4 es que en ambas estaciones existe un incremento en los errores asociados a los pronósticos en las fechas de la entrada del frente frío; en algunos casos las correlaciones son menores a 0.6 y tanto el RMSE como el MAE alcanzan valores de hasta 4°C.

Los valores de la Tabla 3.2 para el caso de Campeche muestran que la correlación es, en promedio, superior a 0.80 para todos los pronósticos, mostrando que el modelo reproduce satisfactoriamente la variabilidad de la temperatura en todo el periodo. El error normalizado con respecto a la amplitud del ciclo diurno es muy estable durante las 72 horas de pronóstico, mostrando que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad diurna de la temperatura. El BIAS por su parte muestra que el modelo tiene una tendencia a sobrestimar ligeramente la temperatura. De manera general, se observa que en esta estación el modelo realiza un buen pronóstico, con errores pequeños en las primeras 24 horas que crecen con el alcance temporal del pronóstico, pero dentro de rangos de confiabilidad razonables.

Para el caso de Angamacutiro, se muestra que la variabilidad de la temperatura es representada con bastante precisión ya que la correlación es mayor a 0.95 en todos los pronósticos. Los errores se muestran ligeramente más grandes que en el caso anterior, el RMSE varía entre 2.6°C y 2.9°C, el MAE entre 2.2°C y 2.5°C, mientras que el BIAS muestra una tendencia a subestimar la temperatura

con valores promedio entre  $-1.5^{\circ}\text{C}$  y  $-2.1^{\circ}\text{C}$ . Contrario al caso anterior, el pronóstico a 24 horas es el que tiene asociados los errores más grandes, sin embargo, las diferencias en los errores de los pronósticos son pequeñas.

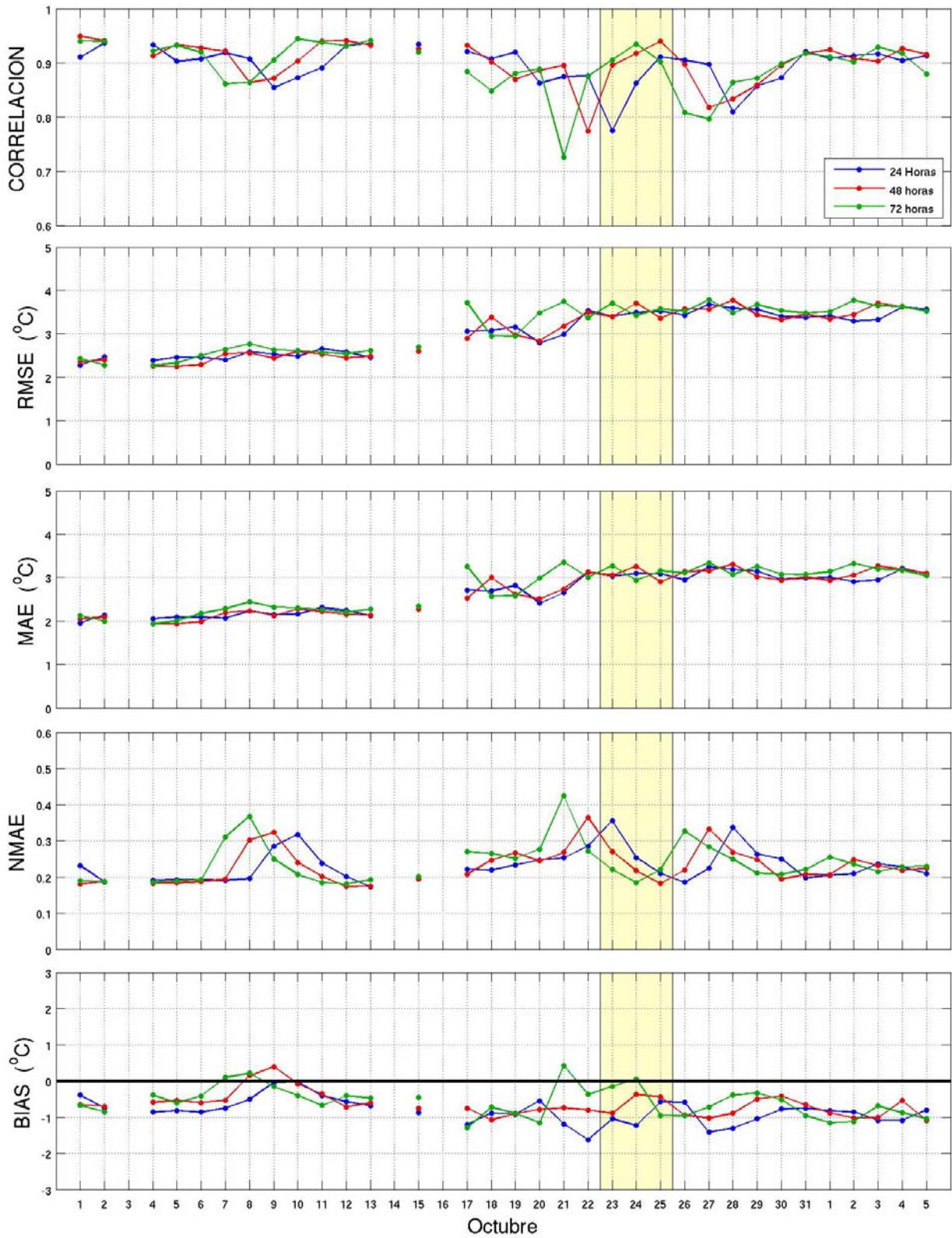
Debido a que no se tienen antecedentes de la validación de los pronósticos en México con el modelo WRF, la magnitud de los errores puede compararse con la de los siguientes trabajos: Jorba *et al.* (2006) aplican el modelo WRF con distintas anidaciones para analizar la calidad del aire en el noreste de la Península Ibérica y los errores que encuentran al evaluar la temperatura varían de  $2^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$  para el RMSE y de  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $-3^{\circ}\text{C}$  para el BIAS; Jorba *et al.* (2008) evalúan las simulaciones numéricas sobre Europa, con errores en el pronóstico de temperatura que varían entre  $1.5^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$  para el MAE; finalmente Zielonka *et al.* (2008) encuentran errores de  $2^{\circ}\text{C}$  a  $3.0^{\circ}\text{C}$  para el MAE y un BIAS que varía entre  $1.5^{\circ}\text{C}$  y  $3^{\circ}\text{C}$  al evaluar el modelo WRF sobre Estados Unidos. Estos antecedentes muestran que el modelo realiza pronósticos con la misma precisión mostrada en lugares geográficamente distintos y alejados de México.

El análisis de los casos particulares muestra que existen diferencias en los errores de los pronósticos dependiendo de la ubicación de la estación. Esto es debido a que un fenómeno meteorológico de mesoescala con un área de influencia de cientos de kilómetros, como el caso de los frentes fríos, puede causar diferentes variaciones en la temperatura dependiendo de la intensidad que tenga el fenómeno cuando afecta a la región en donde se ubica la estación. Otro factor es el hecho de que algunos procesos atmosféricos que se dan alrededor de las estaciones con una escala espacial y temporal pequeña son parametrizados y no reproducidos por la física del modelo con la resolución que se está utilizando. Sin embargo, estos errores podrían ser reducidos al aplicar anidamientos, siempre y cuando se incluyan explícitamente procesos físicos de menor escala.

### **3.3 Temperatura a 2 m: Desempeño general del modelo WRF**

En la figura 3.5 se presentan los estadísticos asociados a los pronósticos de temperatura del modelo WRF a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre, obtenidos al considerar las 72 estaciones y en la figura 3.6 se muestran los promedios de éstos estadísticos con su respectiva desviación estándar.





**Figura 3.5.** Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre. El área amarilla representa las 72 horas del pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.

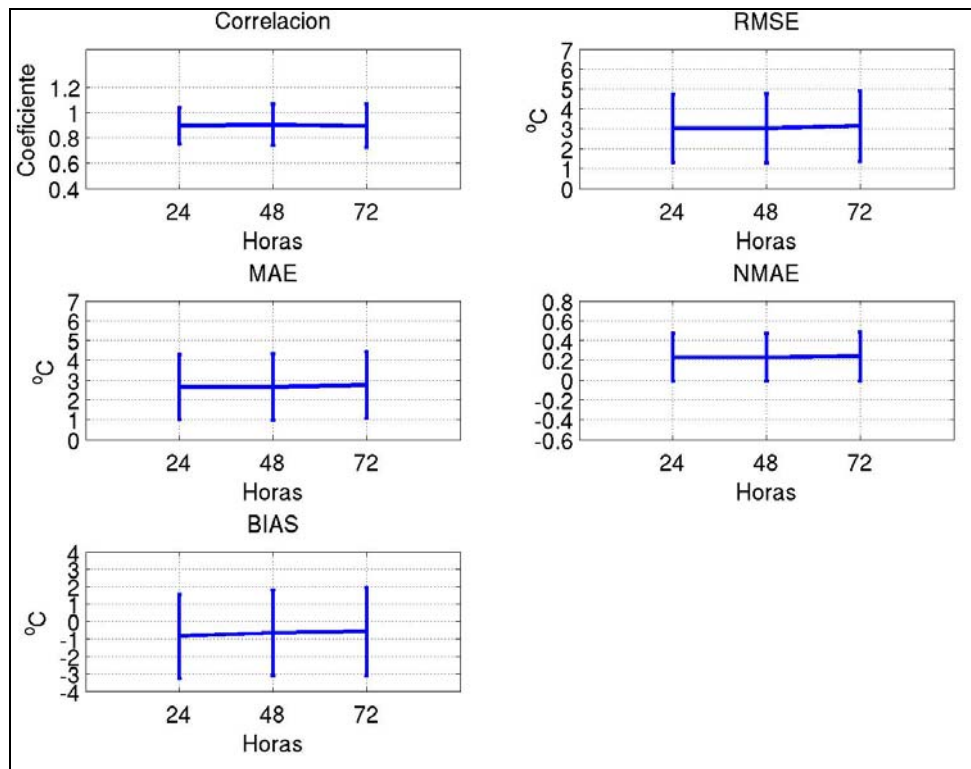
La variación de los estadísticos (Fig. 3.5) muestra que los valores de correlación más bajos en la serie, de aproximadamente 0.72, se obtienen antes de la entrada del frente frío. Estos mínimos son debidos a que el modelo no logra reproducir con exactitud el cambio drástico en la temperatura por efectos del frente, pero sí reproduce buena parte de la variabilidad. Después de estos valores mínimos las correlaciones son mayores a 0.85, debido a que después de que el modelo ha pronosticado el evento las condiciones iniciales para la simulación numérica del día siguiente ya contienen la información suficiente acerca del estado actual del fenómeno y por lo tanto se reduce el grado de incertidumbre en el modelo.

En cuanto a los errores, se observa que el RMSE tiene valores mayores al final del mes de octubre pero Joilliffe y Stephenson (2003) señalan que el RMSE es un estadístico más sensible a errores causados por malos datos o eventos extremos (como es el caso del evento que ocurre en el periodo de análisis), por lo que podría ser mejor evaluar el comportamiento del modelo con base al error promedio absoluto (MAE), sin embargo, este parámetro también muestra valores mayores al final del periodo. El comportamiento mostrado puede estar asociado a que hacia el final del mes el rango de variación de las temperaturas máximas y mínimas del ciclo diurno es mayor como consecuencia los sistemas frontales que empiezan a afectar a México. Shultz *et al.* (1997) mencionan que el descenso de temperatura provocado por los frentes puede ser de hasta 15°C en 24 horas, por lo que estos grandes cambios de temperatura modifican el ciclo diurno y provocan variaciones en un rango más amplio que el modelo reproduce parcialmente. Nuevamente, es importante mencionar que esta deficiencia en el modelo no significa que el modelo no reproduce los descensos de temperatura que provocan los frentes, pues ya se ha mostrado lo contrario, sino que el problema radica en los valores extremos de temperatura, los cuales no pueden ser pronosticados con exactitud por ningún modelo.

El error promedio normalizado con respecto al ciclo diurno (NMAE) de la figura 3.6 muestra el problema de la reproducción de los mínimos y máximos de temperatura en el pronóstico. Para el día 21 de octubre se aprecia que el error mayor del pronóstico ocurre a 72 horas, debido a que el efecto del frente es reproducido por el modelo en las últimas 24 horas. En el pronóstico del 22 de octubre el error se muestra en 48 horas y el día 23 en las primeras 24 horas, mostrando el mismo error con desfases de 24 horas.

En la figura 3.6 se observa que la correlación promedio para el periodo de estudio se mantiene constante para los tres casos de pronóstico con un valor de aproximadamente 0.90, lo cual indica

que el modelo es capaz de reproducir con bastante precisión la variabilidad de la temperatura en la República Mexicana en las 72 horas de pronóstico.



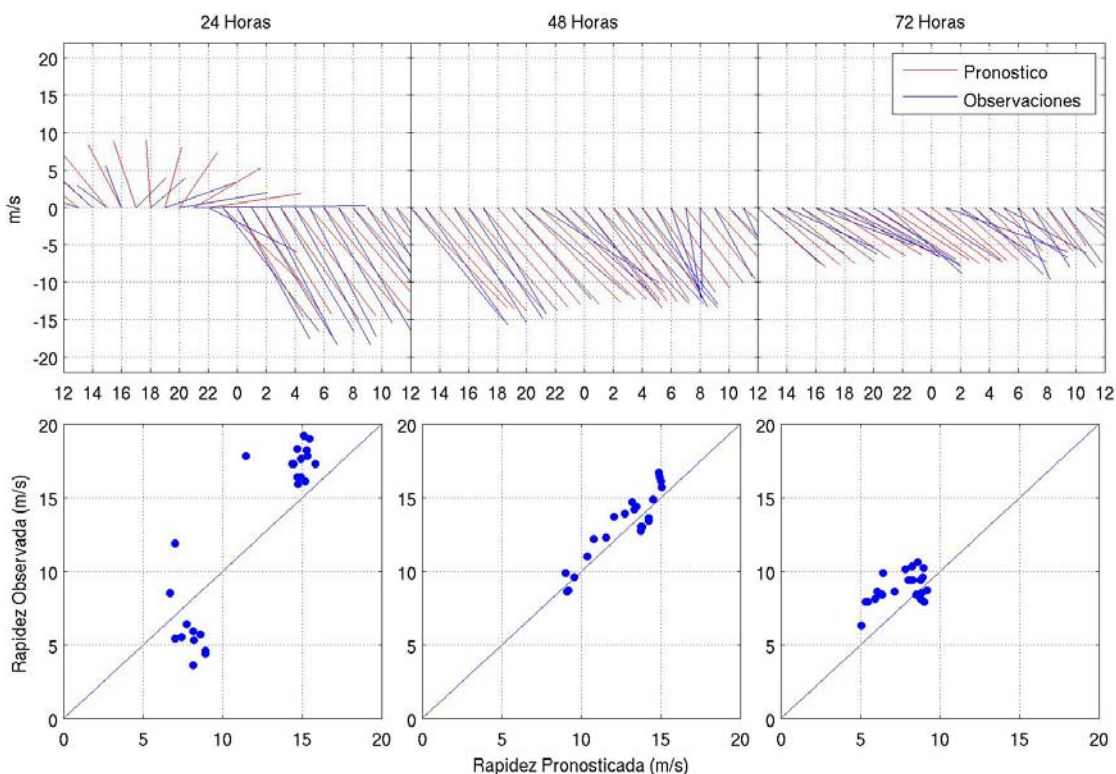
**Figura 3.6.** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF. Las barras verticales indican su desviación estándar.

Los promedios de RMSE y MAE muestran que el error del modelo es de 3°C y 2.6°C, respectivamente, con una desviación estándar alrededor de 1.7°C para el RMSE y 1.6°C para el MAE. En ambos estadísticos se observa un ligero incremento en el error, conforme el alcance del pronóstico; sin embargo es un incremento poco significativo, por lo que se puede considerar que los errores se mantienen prácticamente estables durante las 72 horas de pronóstico.

Finalmente, los valores del BIAS indican que el modelo subestima la temperatura en todo el periodo de estudio en menos de 1°C (Figs. 3.5 y 3.6), que es un resultado similar al de Jorba *et al.* (2006), quienes lo atribuyen al hecho de que el modelo muestra deficiencias al reproducir los máximos y mínimos de temperatura del ciclo diurno.

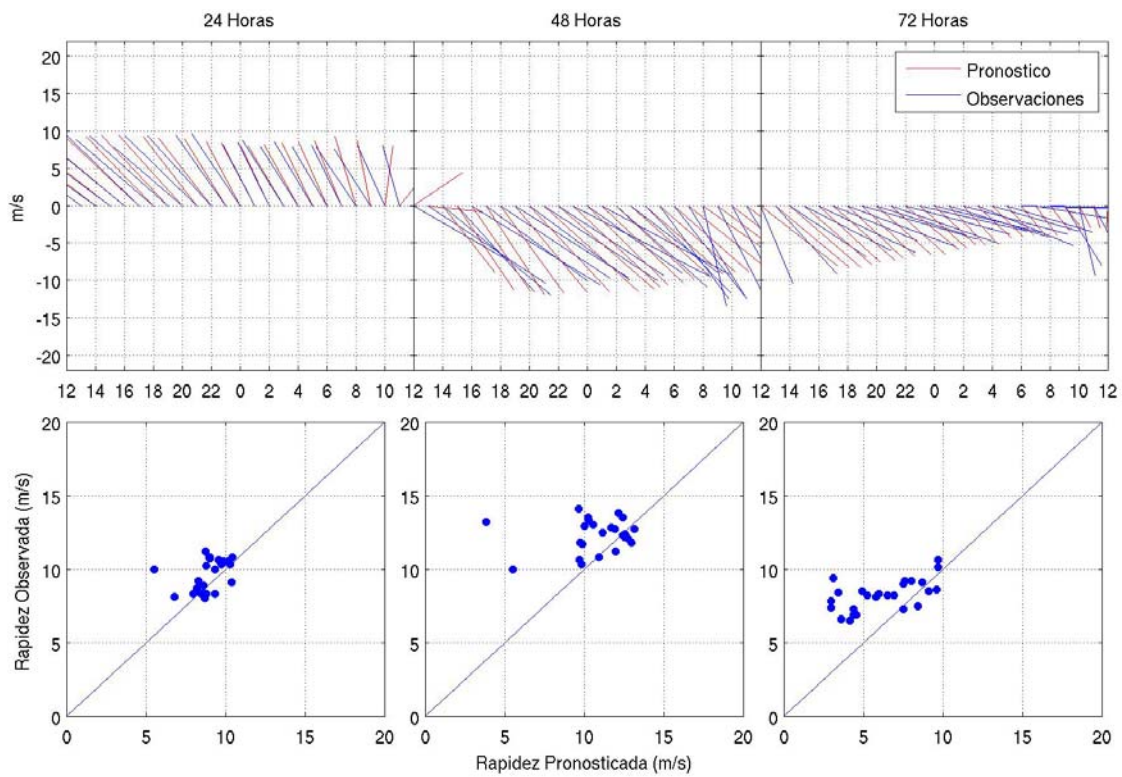
### 3.4 Viento a 10 metros: Casos particulares

Para la validación del viento a 10 m se calcularon los estadísticos tomando en cuenta tres boyas del NDBC ubicadas en el Golfo de México. De la misma manera que se hizo en el caso de la temperatura, se analizarán en primera instancia algunos aspectos particulares de los pronósticos en cada una de las boyas. Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran el pronóstico a 72 horas de la magnitud y dirección del viento, comparado con los datos observados en las boyas 42002, 42001 y 42055, respectivamente. La simulación numérica corresponde al día 22 de octubre del 2007. Los estadísticos correspondientes de los pronósticos se muestran en la Tabla 3.3.

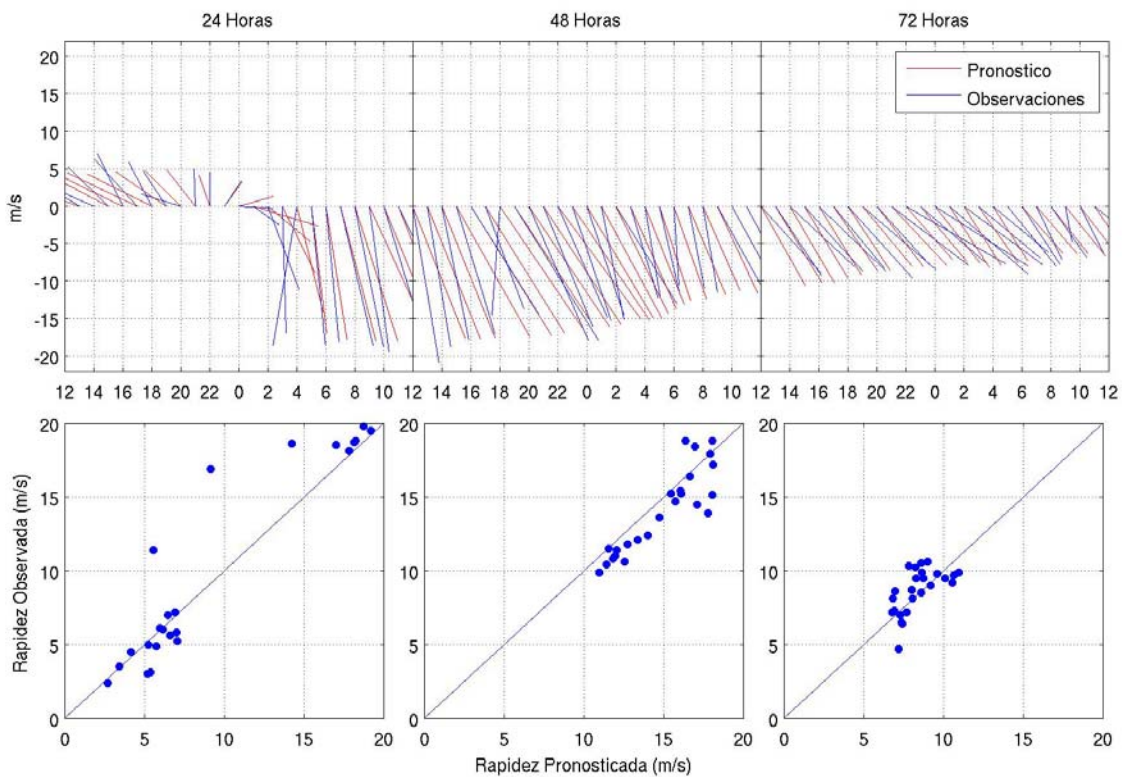


**Figura 3.7.** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42002, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado (azul) y pronosticado por el modelo (rojo) en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento.





**Figura 3.8.** Similar a la figura 3.7 pero para la boya 42001.



**Figura 3.9.** Similar a la figura 3.7 pero para la boya 42055.

**Tabla 3.3.** Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z.

Boya	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. compleja	RMSEV (m/s)	BIASV (m/s)	RMSED (Grados)	BIASD (Grados)
42002	24	0.96	4.5	-0.7	24.3	13.0
	48	0.99	2.0	-0.5	8.1	-1.0
	72	0.98	2.4	-1.3	11.5	5.8
42001	24	0.95	2.9	-0.6	21.7	0.8
	48	0.93	4.7	-1.6	25.6	-5.0
	72	0.90	4.4	-2.0	31.4	23.9
42055	24	0.98	3.2	-0.8	71.8	-11.2
	48	0.99	2.6	0.7	68.0	-5.0
	72	0.98	2.0	-0.2	10.4	5.8

La figura 3.8 muestra el desempeño del modelo en el sitio de la boya 42002, los datos modelados presentan un patrón de variación similar al de las observaciones. La Tabla 3.3 muestra que la correlación entre el vector de viento pronosticado y el observado es superior a 0.95 en todo el periodo de pronóstico, indicando que el modelo reproduce satisfactoriamente el cambio en la magnitud de los vientos por la entrada del frente. Los errores más grandes se presentan durante las primeras 24 horas del pronóstico, cuando se registra la entrada del frente frío. En este periodo, el gráfico muestra que el modelo sobrestima la magnitud del viento antes de la entrada del frente y después la subestima, lo cual puede verse claramente en el diagrama de dispersión correspondiente. Aunque se muestra una doble tendencia, el promedio del pronóstico a 24 horas indica que el modelo subestima la magnitud del viento en menos de 1 m/s (BIASV) y tiene un error cuadrático de 4.5 m/s (RMSEV). Los errores en la dirección del viento indican que, en promedio, el modelo tiende a pronosticar el vector con una desviación de 13° a la izquierda del observado (BIASD) y con un error de cuadrático de 24.3° (RMSED).

Estos errores pueden ser comparados con los obtenidos por Jorba *et al.* (2006), quienes al evaluar el viento a 10 m sobre el noreste de la Península Ibérica para el año 2004, encuentra que el RMSEV

varía entre 4 m/s y 2 m/s a lo largo del año con máximos que alcanzan hasta 8 m/s en condiciones meteorológicas particulares, mientras que el BIASV varía entre 1 m/s a 2 m/s con máximos de hasta 7 m/s. Los errores que encuentran para la dirección del viento indican un RMSED entre 60° y 90° y un BIAS variable entre  $\pm 20^\circ$ .

Es claro que, a pesar de que el modelo presenta errores más grandes cuando existe un fenómeno que cambia súbitamente las condiciones atmosféricas, los resultados muestran que aún en estos casos se reproducen los vientos con bastante precisión, por lo menos en el caso de la boya 42002. Después de este cambio drástico el modelo tiene asociados errores menores. Para las últimas 48 horas de pronóstico el error cuadrático en la magnitud del viento varía entre 2.0 m/s y 2.4 m/s con una tendencia a subestimar ligeramente la magnitud, mientras que para la dirección el error cuadrático es pequeño y varía entre 8.1° y 11.5°, pronosticando el vector con una desviación aproximada de -1° (izquierda) a 5.8° (derecha) con respecto al vector observado. De manera general los estadísticos muestran una muy buena precisión para el pronóstico del viento en este sitio.

En el caso de la boya 42001 (Fig. 3.8) se observa que el modelo reproduce satisfactoriamente el cambio en la magnitud del vector de viento con una correlación igual o mayor a 0.90 para todo el periodo de pronóstico. La Tabla 3.3 muestra que en las 72 horas de pronóstico el RMSEV se encuentra entre 2.9 m/s y 4.7 m/s siendo mayor cuando se registra la entrada del frente (entre 24 y 48 horas debido a que esta boya se ubica al este de la 42002). También se observa que el modelo subestima ligeramente la magnitud del vector, con valores del BIASV entre -0.6 m/s y -2.0 m/s. El error cuadrático más grande en la dirección (RMSED) es de 31.4° para el pronóstico a 72 horas, lo cual puede asociarse a que el modelo tiene problemas para pronosticar el regreso a condiciones atmosféricas más estables. La tendencia del modelo en los pronósticos de la dirección del vector de viento varía a lo largo del periodo: en las primeras 24 horas muestra una ligera tendencia a pronosticar el vector con una desviación menor de 1° hacia la derecha del vector observado, en 48 horas muestra una desviación a la izquierda por 5° y a 72 horas el modelo tiende a pronosticar el vector con una desviación de 23.9° a la derecha, siendo este periodo el que tiene los errores más grandes. Aunque los errores son más variables que en el caso de la boya 42002, el modelo muestra una buena reproducción de la intensidad y dirección del viento en este sitio.

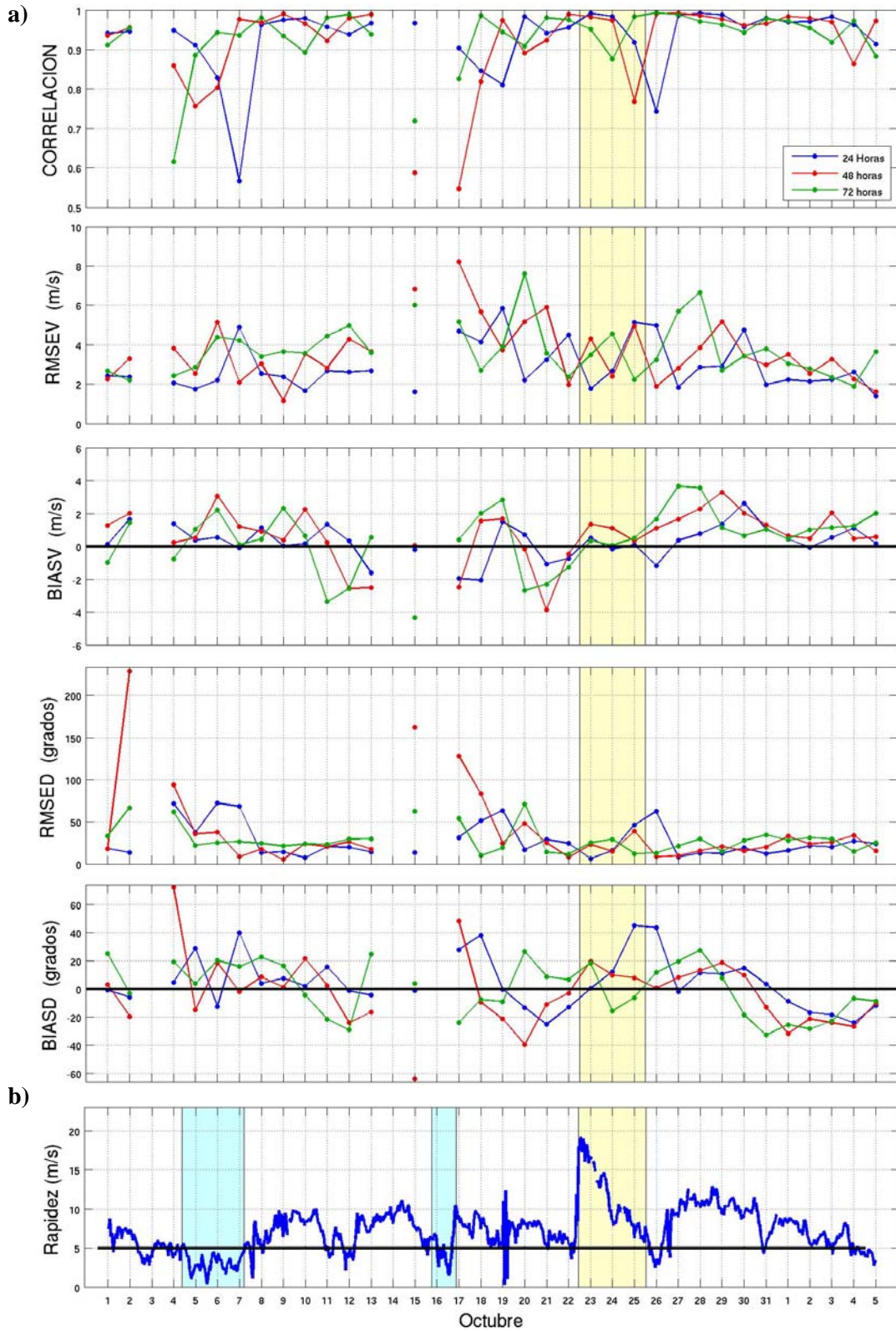
En el caso de la boya 42055 (figura 3.9) los resultados son similares a los obtenidos con los datos de la boya 42002 debido a que estas dos boyas están ubicadas casi a la misma longitud y registran la

entrada del frente con poca diferencia de tiempo entre ellas. La correlación para todo el periodo de 72 horas es superior a 0.95 y muestra que el cambio en la magnitud del viento es bien reproducido por el modelo. Nuevamente los errores más grandes se encuentran en las primeras 24 horas al registrar la entrada del frente: en este intervalo del pronóstico el RMSEV es de 3.2 m/s y el modelo muestra una tendencia a subestimar el viento en -0.8 m/s. Sin embargo, los errores en la dirección son considerables, con un error cuadrático de  $71.8^\circ$  y una tendencia a que el vector pronosticado tenga una desviación de  $11.2^\circ$  a la izquierda del observado; a pesar de esto los errores son menores a los encontrados por Jorba *et al.* (2006). De la misma manera que en la boya 42002 los errores disminuyen en las últimas 48 horas de pronóstico, con valores del RMSEV que varían entre 2 m/s y 2.6 m/s. El BIASV indica que el modelo sobrestima el viento a 48 horas y lo subestima a 72 horas con valores menores a 1 m/s en ambos casos. En cuanto a la dirección del viento se observa que el error cuadrático varía entre  $10.4^\circ$  y  $68^\circ$ . La dirección del viento pronosticado es variable pues en 24 horas y 48 horas es hacia la izquierda y en 72 horas a la derecha, en los tres casos el BIASD es menor a  $12^\circ$ .

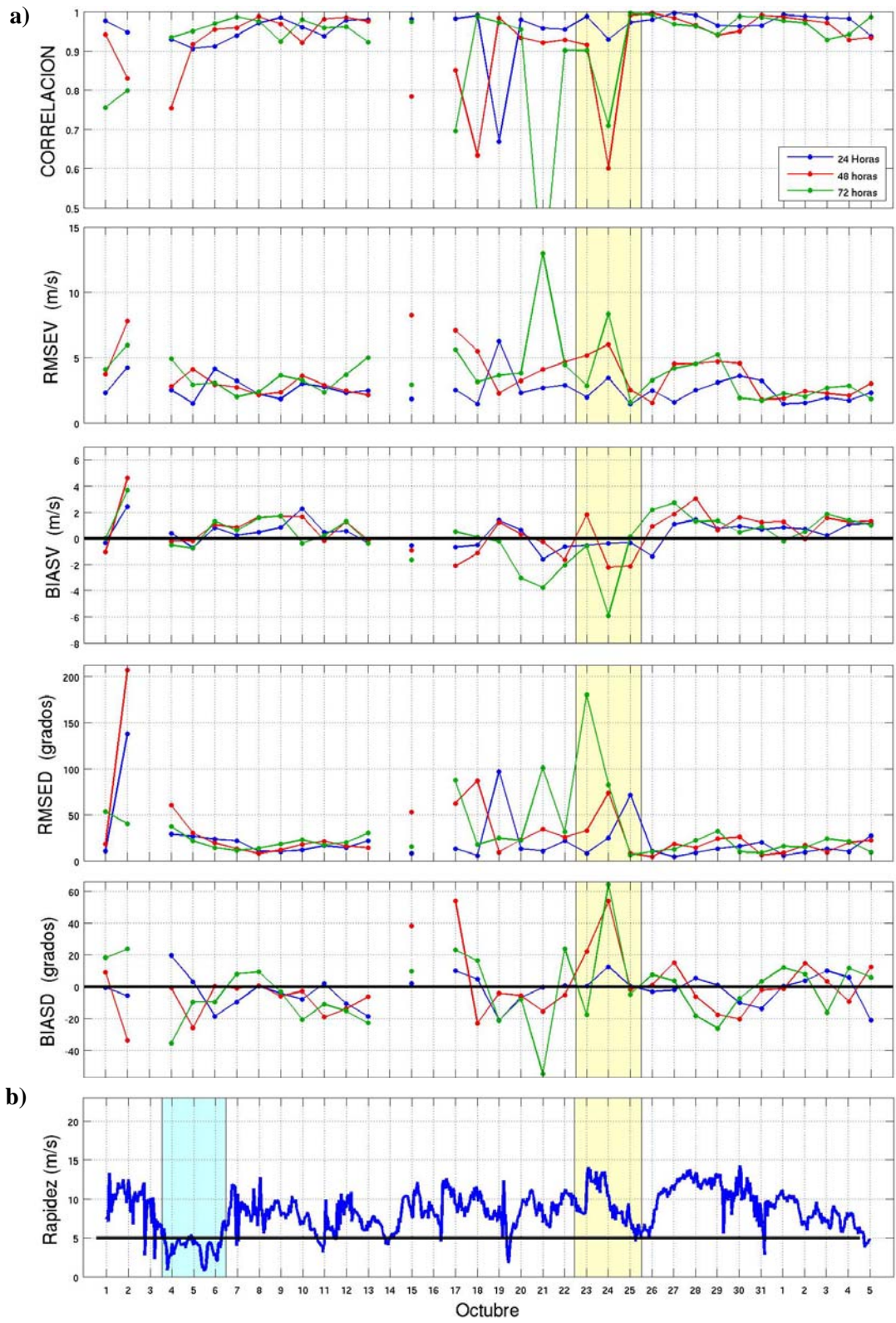
El análisis anterior muestra que, en general, el modelo reproduce bien el vector de viento. Aunque la magnitud de los errores aumenta cuando entra el frente frío, estos son pequeños al compararlos con la magnitud de los cambios en la dirección e intensidad del viento y con los resultados obtenidos por otros autores, por lo que se puede decir que el modelo reproduce satisfactoriamente las condiciones de viento observado.

En las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se presentan los estadísticos obtenidos de la comparación entre los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones de las boyas para el periodo del 1 de octubre al 5 de noviembre. Asimismo, se muestra el gráfico de la rapidez del viento medido en la boya correspondiente, aquí los sombreados azules indican intervalos temporales en los cuales la rapidez observada es menor a 5 m/s. Aunque existen varios eventos con estas características se muestran los que abarcan un periodo temporal más grande, pues aquellos que ocurren en un periodo de tiempo muy corto (alta frecuencia) no pueden ser reproducidos por ningún modelo numérico. En la Tabla 3.4 se muestran los promedios de los estadísticos para todo el periodo.



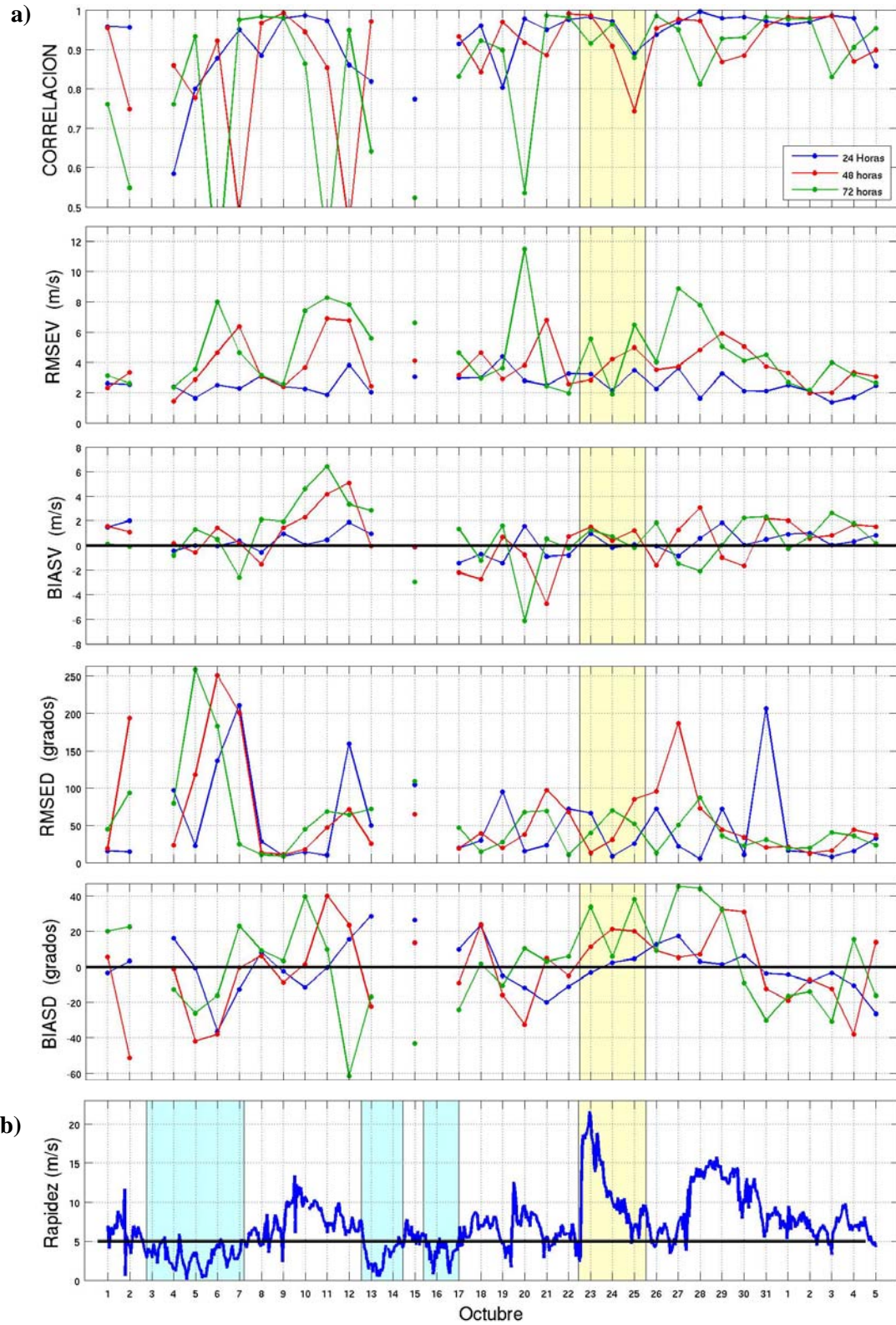


**Figura 3.10.** a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42002. b) Rapidez del viento medido en la boya. Los sombreados azules indican periodos con intensidades de viento menores a 5 m/s.



**Figura 3.11.** Similar a la figura 3.10 pero para la boya 42001.





**Figura 3.12.** Similar a la figura 3.10 pero para la boya 42055.

**Tabla 3.4.** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC.

Boya	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. compleja	RMSEV (m/s)	BIASV (m/s)	RMSED (Grados)	BIASD (Grados)
42002	24	0.93	2.9	0.28	27.5	4.7
	48	0.92	3.6	0.67	39.8	-2.6
	72	0.93	3.7	0.42	29.3	0.5
42001	24	0.96	2.6	0.34	22.6	-2.2
	48	0.92	3.7	0.56	30.7	0.1
	72	0.91	3.8	0.16	31.7	-1.6
42055	24	0.92	2.8	0.27	51.5	0.04
	48	0.87	3.8	0.56	62.0	-1.4
	72	0.84	4.7	0.68	55.6	1.3

Los promedios de la Tabla 3.4 para el caso de la boya 42002 indican que la correlación es mayor a 0.90 en el periodo de análisis pero en la figura 3.10a se muestra claramente que existen dos casos en los que el pronóstico tiene asociadas correlaciones relativamente bajas, el primero puede verse entre el 5 y 7 de octubre y el segundo el día 16 de octubre. Para analizar la fuente de error se ha graficado en 3.10b la rapidez del viento observado en la boya, en donde se muestra con sombreados azules periodos de tiempo en los cuales la rapidez del viento es menor a 5 m/s. Los gráficos muestran que los dos casos representados en la figura 3.10a están relacionados con valores bajos de correlación debido a las intensidades de viento relativamente pequeñas. Sin embargo, los promedios de los estadísticos muestran que la correlación es superior a 0.92, indicando que el modelo realiza satisfactoriamente la variabilidad de la magnitud del viento. El RMSEV varía entre 2.9 m/s y 3.7m/s, el BIASV es menor a 1 m/s, el RMSED es mayor a 27.5° y el BIASD es de  $\pm 5$  grados, sin preferencia a mostrar una desviación a la derecha o izquierda respecto al vector observado.

Para el caso de la boya 42001 los promedios de la Tabla 3.4 indican que el modelo también reproduce satisfactoriamente la variabilidad en la magnitud del viento en este sitio. De la misma

manera que en el caso anterior, en la figura 3.11a se observan un periodo de tiempo en el cual el pronóstico tiene asociadas bajas correlaciones, dicho periodo se encuentra entre el 4 y 6 de octubre, y es asociado también a los registros de intensidades de viento menores a 5 m/s. Otro detalle importante es el hecho de que el incremento en los errores sucede antes del periodo con registros de intensidades de viento pequeñas, debido a que los errores surgen cuando el modelo debe pronosticar en las próximas 24, 48 y 72 horas un viento menor a 5 m/s, por lo tanto, el incremento en los errores para los pronósticos de los días 4 y 5 de octubre están asociados con las intensidad de viento de los días 6 y 7 de octubre. Con el análisis anterior se encuentra que las intensidades de viento pequeñas provocan que los errores aumenten, en el caso del RMSEV el error alcanza los 10 m/s y subestima  $\pm 4$  m/s (BIASV). Para la dirección el RMSED alcanza  $150^\circ$  y se pronostica hasta  $60^\circ$  de separación con respecto al vector observado (BIASD). Sin embargo, los promedios indican que el RMSEV varía de 2.6 m/s a 3.8 m/s y el BIASV es menor a 0.6 m/s durante las 72 horas de pronóstico, la dirección muestra errores menores entre  $22^\circ$  y  $32^\circ$  en el RMSED y un BIASD menor a  $5^\circ$  grados, ya sea a la izquierda o a la derecha. Los promedios de los estadísticos indican que aún considerando las intensidades de viento pequeñas y el cambio drástico en esta variable por causa del frente frío el modelo logra reproducir con buena precisión el vector de viento. Por ultimo cabe mencionar que los promedios indican que los pronósticos son mejores a 24 horas.

En la figura 3.13 se representan los resultados para el caso de la boya 42055, aunque los registros de viento son diferentes a las boyas anteriores también se presentan periodos con pequeñas intensidades de viento, en este caso se encuentran entre el 1 y 17 de octubre.

La deficiencia que se ha encontrado en el modelo en muchos casos es mejorada con la aplicación de anidamientos que permiten recuperar procesos de menor escala (Jorba *et al.*, 2006; Jorba *et al.*, 2008; Zielonka *et al.*, 2008). Sin embargo, varios de los casos mostrados que registran vientos observados menores a 5 m/s ocurren en un intervalo de tiempo muy corto, que difícilmente sería recuperado aún con anidamientos. Además, el tiempo necesario para hacer simulaciones numéricas con anidamientos no es factible para un pronóstico operativo.

### **3.5 Viento a 10 m: Desempeño general del modelo WRF**

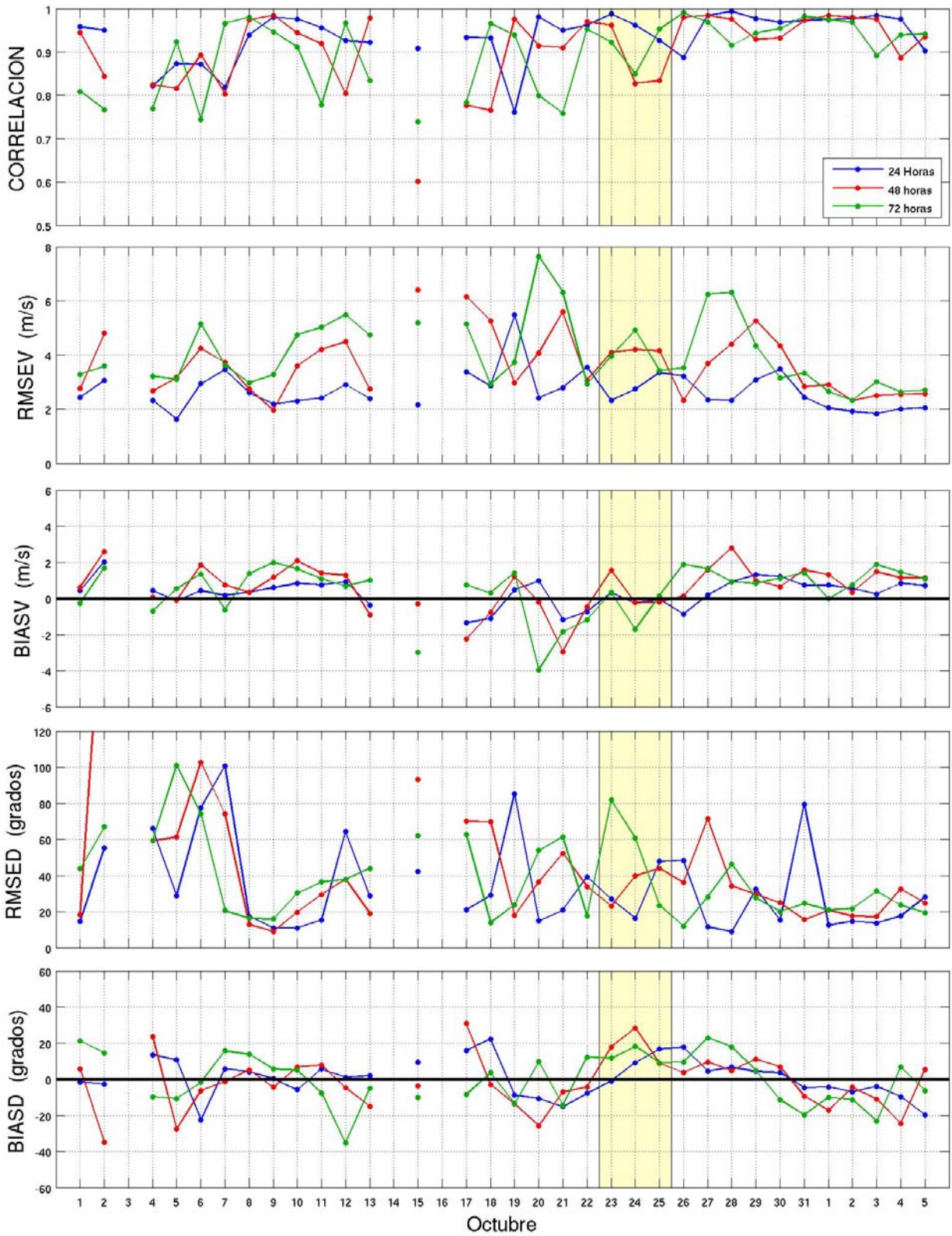
Los estadísticos que describen el desempeño de los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas se muestran en la figura 3.13, estos son obtenidos como un promedio de las tres boyas analizadas que,

a pesar de ser pocas, tienen una buena calidad de datos. Los promedios de los estadísticos considerando el periodo de tiempo del 1 de octubre al 5 de noviembre se presentan en la figura 3.14 indicando sus respectivas desviaciones estándar.

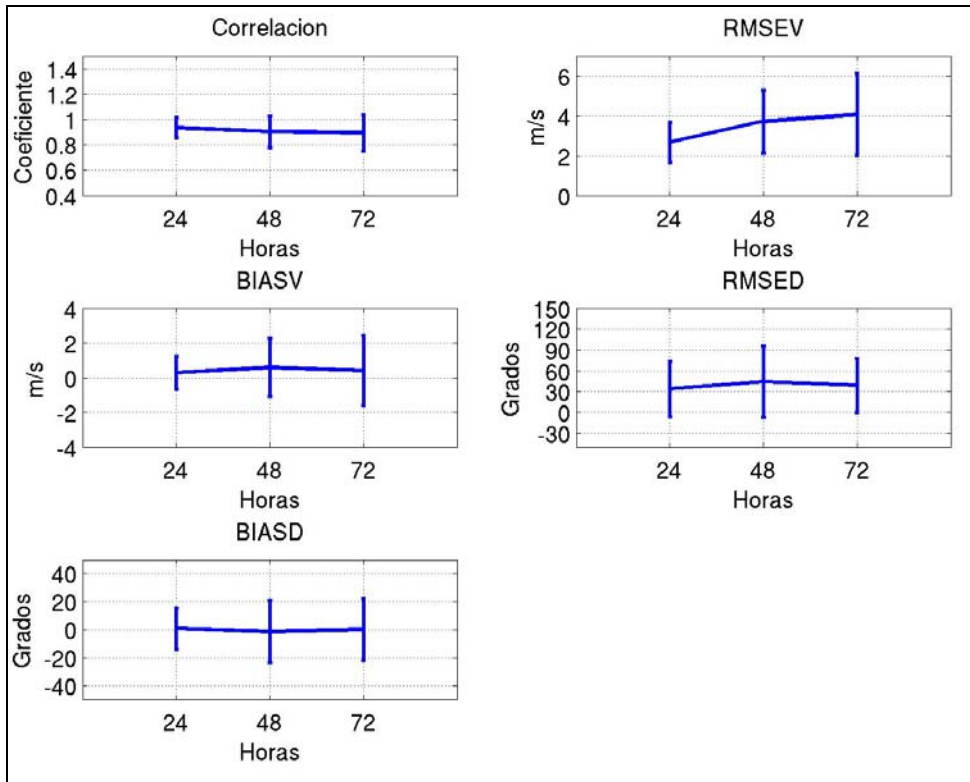
Las series de correlación de la figura 3.13 muestran que los valores más bajos se ubican en la primera mitad del periodo de análisis y, como ya se ha comentado, son debidos a los registros con débil intensidad de viento en las tres boyas, a pesar de ello la correlación muestra que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad en la rapidez del viento pues estos valores se encuentran alrededor de 0.80. Los errores más grandes en el RMSEV y BIASV tienen un valor de 7.6 m/s y -4 m/s respectivamente, y se observan cuando el modelo pronostica la entrada del frente frío. Para el caso de la dirección se observa que el RMSED es muy variable, con grandes errores en la primera semana asociados a las intensidades menores de 5 m/s.

Los promedios de la figura 3.14 muestran que la correlación es superior a 0.90 para los pronósticos a 24, 48 y 72 horas, indicando que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad en la rapidez del viento. En cuanto al RMSED se observa que se incrementa conforme el alcance del pronóstico de 2.7 m/s a 4 m/s, con el valor más pequeño en el pronóstico a 24 horas; el BIAS indica que el modelo subestima ligeramente la magnitud del viento, sus valores son menores a 1 m/s en cualquier etapa del pronóstico. Los promedios de estos estadísticos demuestran mejores resultados que los encontrados por Caballero (2005), quien obtiene correlaciones por debajo de 0.60 y errores entre 17m/s y 22 m/s aplicando diferentes configuraciones del modelo MM5. Los errores en la dirección del viento indican que el RMSED varía entre  $30^\circ$  y  $50^\circ$  y el BIASD varía en un rango de  $\pm 25^\circ$ , sin mostrar una tendencia a que el vector de viento pronosticado se encuentre a la derecha o izquierda del observado. Finalmente, se observa que el pronóstico a 24 horas es mejor que a 48 y 72 horas pues tiene asociados errores más pequeños en casi todo el periodo de estudio aunque las desviaciones estándar se incrementan cuando es mayor el alcance del pronóstico.





**Figura 3.13.** Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre. El área amarilla representa las 72 horas del pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.



**Figura 3.14.** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF. Las barras verticales indican su desviación estándar.

### 3.6 Consideraciones para un trabajo futuro

El trabajo de validación realizado proporciona resultados importantes acerca de la habilidad del modelo WRF para pronosticar las condiciones meteorológicas asociadas a un frente frío que, de acuerdo con los resultados que se presentan en el capítulo siguiente, puede considerarse como un evento extremo. Se han obtenido buenos resultados tanto para el pronóstico de temperatura como de viento, sin embargo, es necesario enfatizar algunos puntos que pueden ser importantes para un trabajo posterior y que permitirán analizar con más detalle la confiabilidad del modelo.

En el caso de la temperatura, el modelo parece tener un comportamiento distinto para los sitios que se encuentran cercanos a la costa, muy probablemente debido a que estos puntos están influenciados por fenómenos más locales, por lo que se podría realizar la evaluación del modelo considerando a estos puntos por separado. Otro aspecto importante es que el proceso de validación debe extenderse



a un periodo de tiempo más largo, por ejemplo un año, para conocer el desempeño del modelo en distintas condiciones meteorológicas y tener estadísticos más robustos. En cuanto al viento estimado por el modelo también es deseable analizar un periodo de tiempo más largo, por ejemplo una temporada completa de nortes, además de considerar un número mayor de observaciones con el fin de corroborar el buen desempeño del modelo aún en condiciones meteorológicas extremas.

Un aspecto que podría mejorar los resultados sería implementar la asimilación de datos para mejorar las condiciones iniciales que utiliza el modelo y que podrían disminuir los errores asociados a cambios rápidos en las condiciones atmosféricas. Finalmente, es importante mencionar algunas consideraciones referentes a la metodología, por ejemplo Stenger (2000) encontró que utilizando el método de verificación celda-punto (sin hacer interpolaciones) y aumentando la resolución del modelo a través de anidaciones mejora la habilidad en los pronósticos. Sin embargo, los costos computacionales siempre se deben tener en cuenta, sobre todo si la evaluación está enfocada a un sistema de pronóstico que funcione de manera operativa, como fue planteada en este caso.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

Climatológicamente, la República Mexicana es afectada a lo largo del año por distintos sistemas meteorológicos, cuya intensidad o frecuencia en una región determinada puede contribuir a desastres como el sucedido en Villahermosa, Tabasco a finales de octubre y principios de noviembre del 2007. Esto sugiere que el estudio de los fenómenos atmosféricos que comúnmente afectan a México, es de suma importancia para evitar o mitigar futuros accidentes. En este trabajo de investigación se analizaron las salidas de un modelo numérico y diversos conjuntos de datos con el fin de estudiar las condiciones meteorológicas asociadas a este evento.

El análisis de las precipitaciones que contribuyeron a la inundación en el estado de Tabasco, mostró que éstas ocurrieron en dos periodos de tiempo, el primero de ellos entre el 22 y 25 de octubre y el segundo del 28 de octubre al 2 de noviembre. De manera general, se mostró que el modelo reproduce satisfactoriamente los fenómenos que se conjugaron para dar origen a los dos periodos de precipitaciones intensas en la región de estudio. Estos eventos pueden resumirse de la siguiente manera:

**Precipitaciones del primer periodo (Del 22 al 25 de octubre):** Se debieron al alto contenido de humedad a lo largo de la línea frontal que cruzó el Golfo de México con una orientación de noreste a suroeste, y que interaccionó con la humedad asociada a un pequeño sistema de baja presión sobre el sur del Golfo, provocando fuerte convección sobre esta región y extendiéndose hasta los estados de Veracruz, Chiapas y Tabasco, además contribuyó el transporte de humedad asociado a los vientos dirigidos hacia el Istmo.

**Precipitaciones del segundo periodo (Del 28 al 31 de octubre):** Principalmente fueron debidas al gran transporte de humedad que se mantuvo en la región por más de 48 horas, a lo largo de una región confinada de vientos intensos (jet) desde Florida hasta el Istmo de Tehuantepec, siguiendo la línea de un frente estacionario. El máximo transporte de humedad por causa de este jet sucedió por debajo de los 850 hPa. Otro factor que contribuyó al gran transporte de humedad fue una zona con gran contenido de humedad ubicada en el sur-occidente del Mar Caribe.

Por otra parte, el análisis de las condiciones meteorológicas asociadas a la tormenta tropical Noel, indican que este sistema no aportó humedad que influyera en las precipitaciones del segundo evento por dos razones: primera, la lejanía de este sistema con respecto a la zona del Istmo de Tehuantepec el día 28 de octubre; segunda, el alto contenido de humedad asociado a la tormenta tropical Noel no muestra advección hacia la región del jet, y por tanto, tampoco hacia la región del Istmo.

La evaluación de la precipitación ocurrida en ambos eventos indica que las simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF reprodujeron de mejor manera, cuantitativa y espacial, la precipitación acumulada en comparación con la estimada por el TRMM. El análisis de las estaciones indicó que los valores de RMSE y BIAS son casi dos veces más grandes que los obtenidos por el modelo. Para el caso del segundo evento el modelo produce un máximo de precipitación acumulada al sur del estado de Veracruz que no se observa en los datos del TRMM, sin embargo, no se consiguieron datos de precipitación en esa región que descarten o confirmen este máximo.

Aunque no se determinó un periodo de retorno exacto de las precipitaciones ocurridas en Chiapas y Tabasco, los registros climatológicos indican que en los últimos 30 años se han presentado por lo menos dos eventos de precipitación similares al estudiado. Sin embargo, la interacción de un evento de norte con sistemas tropicales, como ocurrió en este periodo, es un fenómeno que puede darse en cualquier año, particularmente en el mes de octubre, por ser un periodo en el que los fenómenos meteorológicos tanto de invierno como de verano afectan a la República Mexicana.

El análisis de la intensidad de vientos asociados al frente frío número 4 que afectó el Golfo de México los días 22 y 23 de octubre, mostró que la magnitud de los nortes que ocurren con mayor frecuencia tienen asociadas intensidades de viento entre 13 m/s y 15 m/s, y representan el 36% de los casos, mientras que los nortes con una intensidad superior a los 21.2 m/s, como el ocurrido el 23 de Octubre, representan aproximadamente el 1.5% del total.

El proceso de validación aplicado a la temperatura obtenida por el modelo puede resumirse en los siguientes puntos:

- El modelo es capaz de reproducir gran parte de la variabilidad asociada a la escala sinóptica y al ciclo diurno de temperatura, así como la variabilidad debida a cambios drásticos en las condiciones atmosféricas, como sucede cuando afectan los frentes fríos a México.
- Los mínimos de temperatura provocados por los sistemas de alta presión que afectan a México pueden ser subestimados por el modelo, sin embargo, se debe considerar que el caso de estudio representa un fenómeno atmosférico que ha sido calificado como extremo, por lo que los errores pudieran disminuir en otros casos.
- Los errores asociados a los pronósticos muestran que el pronóstico hasta 72 horas es bastante aceptable ya que, tanto la magnitud del RMSE como del MAE asociada a los pronósticos, es de aproximadamente 3°C en promedio, con una tendencia a subestimar los mínimos diurnos de esta variable en menos de 1°C (BIAS).

Para el caso del viento se concluye que:

- El modelo reproduce satisfactoriamente los cambios drásticos en la dirección y magnitud del viento asociados al evento extremo.
- Los errores en magnitud se mantienen acotados entre 2 m/s y 5 m/s para cualquier magnitud de viento y aumentan en los casos del evento extremo, con errores menores a 50° en la dirección del vector, sin presentar un error sistemático en la dirección del viento.
- En condiciones de viento débil, alrededor de 5 m/s (18 Km/hr), el modelo tiene mayores errores en la dirección del viento, sin preferencia por alguna dirección con respecto al vector de viento observado.
- En condiciones de vientos intensos, mayores a 17 m/s (~61 Km/h), el modelo tiene menores

errores en dirección y subestima ligeramente la magnitud, al menos durante este evento.

- Los pronósticos a 24 horas antes de un evento de norte son considerablemente mejores que los de 48 y 72 horas.

## **Recomendaciones**

La magnitud de los errores calculados es menor que los obtenidos en otros estudios y los errores más grandes están asociados al paso de un frente frío considerado como extremo, por ello se sugiere analizar un periodo de tiempo más largo para conocer el desempeño del modelo en distintas condiciones meteorológicas y tener estadísticos más robustos.

Por otra parte, el conjunto de los resultados obtenidos con la aplicación del modelo WRF a la República Mexicana, permite inferir que el sistema de pronóstico numérico en tiempo real, implementado de manera operativa en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, reproduce con bastante precisión las condiciones atmosféricas de los sistemas que comúnmente afectan a México y las asociadas al evento extremo, por lo que su implementación de manera operativa ofrece grandes ventajas para el pronóstico del tiempo.

# BIBLIOGRAFÍA

Bosart, L. F., Archambault, H. M. y Cordeira, J. M., 2008. Flooding in southern Mexico, tropical cyclone Noel and intense European storm in late October and early November 2007: Linked weather systems?. 28th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology. Del 27 de abril al 2 de mayo del 2008.

Disponible en su sitio electrónico: <http://ams.confex.com/ams>

Brooks H.E., y C.A. Doswell, 1996: A comparison of measures-oriented and distributions-oriented approaches to forecast verification. *Wea. Forecasting*, **11**, 288-303.

Caballero, G., J. M., 2005: Predictibilidad de nortes en aguas mexicanas. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. 89 pp.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2008: Tabasco: Características e impactos socioeconómicos de las inundaciones provocadas a finales de octubre y a comienzos de noviembre de 2007 por el frente frío número 4. 231 pp.

DiMego, G. J., L. F. Bosart, y G. W. Endersen, 1976: An Examination of the Frequency and Mean Conditions Surrounding Frontal Incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 709–718.

Finley, J. P., 1884: Tornado predictions. *Amer. Met. J.*, **1**, 85-88.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Jolliffe, I. T. y Stephenson D. B., 2003: *Forecast verification: A partitioner's guide in atmospheric sciences*. John Wiley and Sons. 254 pp.

Jorba, O., Jiménez, P. y Baldasano, J.M., 2006. Simulación anual con elevada resolución especial para aplicaciones de la calidad del aire. Memorias de la XXIX Jornada Científica de la Asociación Meteorológica Española. Del 24 al 26 de abril del 2006. Pamplona, España.

Disponible en su sitio electrónico: <http://www.ame-web.org>

Jorba, O., Loridan, T., Jiménez G., P y Baldasano, J. M, 2008. Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. Presentaciones del 9<sup>th</sup> Annual User's Workshop, del 23 al 27 de junio del 2008. Boulder, Co. USA.

Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parametrization: An update. *J. Applied Meteorology*, **43**, 170-181.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. Yang, J. J., Hnilo, M. Fiorino G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.

Kundu, P. K., 1976: Ekman Veering Observed near Ocean Bottom. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 238-242.

Kusaka, H., Crook, A., Dudhia, J. y Wada, K., 2005: Comparison of the WRF and MM5 models for simulation of heavy rainfall along the Baiu Front. . *SOLA*, **1**, 197-200.

Pielke, R. A., 2001: *Mesoscale Meteorological Modelling*. 2nd Edition. Academic Press. 676 pp. Volumen 78 en la *International Geophysics Series*.

Schultz D. M., W. E. Bracken, L. F. Bosart, G. J. Hakim, M. A. Bedrick, M. J. Dickinson y K. R. Tyle, 1997: The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Mon.*

*Wea. Rev.*, **125**, 5-39; Corrigendum, **125**, 662.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional, 2007: Reseña del intenso frente frío número 4 en base a las notificaciones oficiales emitidas por el SMN.

Skamarock, W. C, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang y J. G. Powers: 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

Stauffer, D.R. y N.L. Seaman, 1990: Use of Four Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1250-1277.

Stenger, R. A., 2000: Sensitivity studies on a limited area mesoscale model: an examination of lateral boundary placement , grid resolution and nesting type. Air Force Institute Tecnology. Thesis for the degree of Master of Science in Meteorology, 215.pp.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.

Willmott, C. J., 1982: Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 1309-1313.

Zielonka, J. R., Gaudet, B. J., Seaman, N. L., Stauffer, D. R., Deng A., y Hunter G.K., WRF and MM5 Realtime Systems: Statistical comparisons using the Model Evaluation Toolkit (MET). Presentaciones del 9<sup>th</sup> Annual User's Workshop, del 23 al 27 de junio del 2008. Boulder, Co. USA.

### **Referencias electrónicas:**

CISL. Research Data Archive, 2008. Sitio electrónico que contiene los análisis finales del modelo GFS y datos de Reanálisis NCEPR2.

<http://dss.ucar.edu/>

Consultada en agosto del 2008.



CRWS. California Regional Weather Service, 2007. Imágenes infrarrojas satelitales.

<http://squall.sfsu.edu/>

Consultada en noviembre del 2007.

GFS, Global Forecast System, 2008. Sitio electrónico que contiene las salidas del modelo GFS.

<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>

Consultada en agosto del 2008.

HPC, Hydrometeorological Prediction Center, 2008. Análisis de condiciones meteorológicas en superficie.

<http://www.hpc.ncep.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2008. Información geográfica de México.

<http://www.inegi.org.mx>

Consultada en agosto del 2008.

NDBC, National Data Buoy Center, 2008. Obtención de observaciones meteorológicas en el Golfo de México.

<http://www.ndbc.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

NHC, National Hurricane Center, 2008. Reportes de ciclones tropicales correspondientes a la temporada 2007.

<http://www.nhc.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

UCAR, University Corporation for Atmospheric Research, 2008a. Guía de usuarios del modelo WRF, versión 3.0.

[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)

Consultada en agosto del 2008.

UCAR, University Corporation for Atmospheric Research, 2008b. Sitio de desarrollo del modelo MM5.

<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>

Consultada en noviembre del 2008.

PGI, Portland Group, 2008. Compiladores para cluster.

<http://www.pgroup.com/>

Consultada en mayo del 2008.

Senado de la República, 2008. LX legislatura. Boletín de prensa B-0250. Accidente ocurrido en la Plataforma Usumacinta.

<http://comunicaion.senado.gob.mx/>

Consultada en octubre del 2008.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional, 2008. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas.

<http://smn.cna.gob.mx/>

Consultada en agosto del 2008.

TRMM, Tropical Rainfall Measurement Mision, 2007. Estimación de precipitación por medio de satélite.

<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

Consultada en noviembre del 2007.